

Zum Farbsehen des Menschen:

Psychophysisch registrierte Farbtonänderungen
als Funktion der Sättigung.

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde

Fakultät für Biologie
der Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg i. Br.

vorgelegt von
Wolfgang Kurtenbach
aus Schwäbisch Hall
1979

Referent der Arbeit: Prof. Dr. Bernhard Hassenstein
Biologisches Institut der Albert-
Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.

Leiter der Arbeit: Priv. Doz. Dr. Lothar Spillmann
Neurologische Klinik Freiburg,
Sonderforschungsbereich 70
Hirnforschung, Teilprojekt A 6,
Psychophysik.

Koreferent: Prof. Dr. Rainer Hertel
Biologisches Institut der Albert-
Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Promotionsvortrag: 10.1.1979

Promotionsprüfung: 4.12.1979



Inhaltsverzeichnis:

1.	<u>Einleitung</u>	
1.1.	Methoden und Definitionen	3
1.2.	Der Abney-Effekt	11
1.3.	Schwarzverhüllung	19
2.	<u>Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung</u>	
2.1.	Das Maxwellian-View-System	22
2.2.	Eichung des Maxwellian-View-Systems	26
2.3.	Versuchsmethodik	28
2.4.	Versuchspersonen	30
3.	<u>Vorversuche</u>	
3.1.	Bestimmung des individuellen Neutralweiß	
3.2.	Herstellung gleichheller monochromatischer Testreize	35
3.3.	Herstellung farbiger Reize mit unterschied- licher Sättigung	39
3.4.	Die Farborte der reinen Farben	41
3.5.	Konfigurationen	45
3.6.	Streuung	47
4.	<u>Ergebnisse</u>	
4.1.	Vergleich mit den Ergebnissen Abneys	51
4.1.1.	Weißverhüllung (Konfiguration I)	55
4.1.2.	Ergebnisse für 4 Weißarten und 3 Vpn.	57
4.1.3.	Diskussion	60
4.1.4.	Zusammenfassung	69
4.2.	Schwarzverhüllung (Konfigurationen II & III)	70
4.2.1.	Ergebnisse mit Konfiguration II	71
4.2.2.	Ergebnisse mit Konfiguration III	75
4.2.3.	Diskussion	79
4.3.	Neurophysiologische Befunde zur Schwarzver- hüllung (Konfiguration III)	
4.3.1.	Einleitung	82
4.3.2.	Methode	90
4.3.3.	Ergebnisse	92
4.3.4.	Diskussion	98

5. Zusammenfassende Diskussion

- 5.1. Vergleich der Ergebnisse für Weiß- und Schwarz-
verhüllung 109
- 5.2. Unveränderliche Farben 114
- 5.3. Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren . 120
- 5.4. Darstellung der Ergebnisse im CIE-Diagramm . . 131
- 5.5. Unterschiede zwischen den Versuchspersonen . . 134

Bemerkungen für den Leser:

Wer heute in einem naturwissenschaftlichen Fach eine Doktorarbeit schreibt, bearbeitet meist einen kleinen Aspekt in einem schon spezialisierten Gebiet. Er ist Lieferant wissenschaftlicher Fakten, die mit einem großen Aufwand an Geräten und Zeit gewonnen, oft nur einen kleinen Beitrag zur Prüfung einer Hypothese bilden.

Dementsprechend sind die meisten Arbeiten nur für einen kleinen Kreis von Spezialisten wichtig und manchmal auch nur für sie verständlich. Um diese Arbeit auch dem nicht spezialisierten Leser zugänglich zu machen, sind die Fachwörter, die im deutschen Sprachraum definiert sind, in der Einleitung erklärt. Jedem Kapitel habe ich eine kurze Einleitung vorangestellt. Am Ende jedes Kapitels werden die jeweiligen Ergebnisse in einem eigenen Abschnitt diskutiert.

Ich danke Herrn Professor Hassenstein, der die Leitung der Arbeit übernommen hat. Dr. Lothar Spillmann, Dr. Bill Wooten, Dr. Charles Sternheim, Dr. Hartmut Ebenhöf und Dr. Arne Valberg danke ich für viele Anregungen und die kritische Durchsicht des Manuskripts. Dr. Spillmann hat als Betreuer der Arbeit viel zu ihrem Gelingen beigetragen. Gefördert wurde die Arbeit von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Projekt A 6.

Dank schulde ich auch meinen Versuchspersonen Barbara Pingel, Gisela Hahn, Traudi Abele und Clemens Deißler, die die langen Versuche geduldig durchgelitten haben. Das gleiche gilt für die stetige Hilfe durch Mechanikermeister Günter und Elektroniker Brenneisen.

1. EINLEITUNG

1.1. Methoden und Definitionen

In dieser Arbeit wird ein Teil des menschlichen Sehsystems mit den Methoden der Psychophysik untersucht.

In der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts beschränkte sich die psychophysische Forschung auf die Beziehungen zwischen Reiz und Wahrnehmung, weshalb sie auch "äußere Psychophysik" genannt wurde. Seit durch verbesserte Techniken in der Neurophysiologie immer bessere Daten über den Aufbau und die Verarbeitungsprozesse im menschlichen Sehsystem gewonnen werden, versuchen Psychophysiker unter Einbeziehung dieser Ergebnisse Aussagen über die Struktur des Systems zu machen. Dies scheint in einigen Fällen möglich, obwohl die Methoden der Forschungsrichtungen sehr verschieden sind.

Die neurophysiologischen Daten zum Sehsystem werden ausschließlich an Tieren gewonnen, wobei das Tier in der Regel betäubt ist. Es wird künstlich beatmet, gewärmt und fixiert. Die bevorzugten Versuchstiere sind Affen, Katzen, Molche und Fische.

Psychophysische Versuche werden meist mit Menschen durchgeführt. Die Versuchspersonen berichten über ihre Wahrnehmung auf Reize, die ihnen, meist unter

Standardbedingungen, geboten werden. Aus diesen Daten wird versucht, auf die Umsetzung von Reiz zu Wahrnehmung zu schließen.

Diese methodischen Unterschiede bedingen, daß Analogieschlüsse zwischen den Ergebnissen beider Richtungen nur relative Gewißheit haben. Schon ein Vergleich der Sehsysteme bei Säugetieren zeigt, wie unterschiedlich der anatomische und neurologische Aufbau ist. Dennoch liegen heute so viele neurophysiologische Daten vor, daß die Verbindung beider Methodensysteme von vielen Forschern gefordert wird, trotz aller Unsicherheiten.

Aus den Ergebnissen über das visuelle System des Affen schließt Jung (1973), daß dieses ein geeignetes Modell für die Verhältnisse beim Menschen sein kann. Jung (1972) versucht anhand einiger Beispiele nachzuweisen, wie Wahrnehmungsphänomene mit einem neuronalen Korrelat verknüpft werden können. Ich habe in dieser Arbeit eines der von mir untersuchten Phänomene, die Schwarzverhüllung, auch neurologisch untersucht, indem ich aus dem Geniculatum des Affen abgeleitet habe.

Das visuelle System des Menschen ist ein Analysator für elektromagnetische Wellen in einem Bereich von 380 bis 780 nm. Dieser Wellenlängenbereich wird als LICHT bezeichnet. Licht, welches in das Auge

fällt, löst unmittelbar eine Gesichtsempfindung aus: wir sehen etwas.

In dieser engen Definition bedeutet Sehen die Wahrnehmung von Helligkeits- und/oder Farbumterschieden und ihre Lage zueinander. Nicht in der Definition enthalten ist das ERKENNEN der Reize, welches die Identifizierung eines Wahrnehmungsbildes beschreibt. Das wahrgenommene Bild wird hier mit einem Erinnerungsbild verglichen und erkannt.

Für das Wort Wahrnehmung wird heute in der sinnesphysiologischen Literatur sinngleich das Wort Empfindung verwendet.

Nicht jede Wellenlänge löst im Verhältnis zur eingestrahlten Energie eine gleich starke Erregung in den Rezeptoren der Netzhaut aus.

Für grüne Farbtöne z.B. ist unser Auge empfindlicher als für blaue und rote Farbtöne. Dabei spielen nicht nur die Anzahl und Art der Sehpigmente eine Rolle, sondern auch die Art der zentralen Datenverarbeitung, die eine subjektive Helligkeitsbewertung bedingen. Gleich hell aussehende Farbtöne haben also zumeist eine unterschiedliche physikalische Intensität. Bei Untersuchungen zum menschlichen Sehsystem ist es vorteilhaft, die Helligkeit von optischen Reizen nicht nur in physikalischen Einheiten anzugeben. Zur Kennzeich-

nung der wahrgenommenen Helligkeit verwendet man eine auf die spektrale Helligkeitsbewertung des Auges bezogene Maßeinheit, die LEUCHTDICHTE.

Erscheinen einem Normalbeobachter zwei farbige Reize gleich hell, so haben sie dieselbe Leuchtdichte.

Die Menge aller visuellen Wahrnehmungen läßt sich in Wahrnehmungsqualitäten einteilen. Solche sind: Form, Bewegung, Farbe, Helligkeit.

Die Wahrnehmungsqualität, die ich untersucht habe, war Farbe. Heute teilt man die Farben in zwei Gruppen ein:

1. Bunte Farben: Farbempfindungen, bei denen ein Farbton wahrgenommen wird.
2. Unbunte Farben: Farbempfindungen ohne Farbton.
Sammelbegriff für Weiß, Grau und Schwarz.

Farben, die überwiegend einen Farbton gemeinsam haben, nennt man Farben der gleichen Farbart. Innerhalb einer Farbart lassen sich die Farbtöne noch nach Helligkeit oder Sättigung ordnen. Eine Sättigungsreihe für Rot reicht z.B. von weißlichen Rottönen (rosa) zu sehr kräftigem Rot (scharlachrot). Die Sättigung einer Farbe wird auch Farbstärke, Weißgehalt oder Färbekraft genannt. In der Regel sehen wir unter natürlichen Bedingungen nicht

nur verschiedene Farben, sondern können diese noch nach Farbton, Sättigung und Helligkeit unterscheiden. Eine Mischung aus gelber Farbe (50%) und weißer Farbe (50%) hat den Farbton gelb, die Sättigung 50% (Ebenhöh, 1976) und, je nach Beleuchtung, die Leuchtdichte L. Da diese Wahrnehmungsqualitäten durch Vergleich "erlernt" werden, werden sie auch so definiert:

Farbart:

Erscheinen bei monokularer Beobachtung zwei aneinander-grenzende Flächen gleicher Form, Struktur, Größe und Helligkeit ungleich, so unterscheiden sie sich durch ihre Farbart.

Farbton:

Sehen zwei bunte Flächen gleicher Sättigung und Helligkeit ungleich aus, so unterscheiden sie sich im Farbton.

Sättigung:

Sättigung ist diejenige Komponente einer Farbmempfindung, die bei gleichem Farbton und Helligkeit den Grad der Buntheit kennzeichnet.

Die drei Wahrnehmungsqualitäten Farbton, Sättigung und Helligkeit werden nicht unabhängig voneinander wahrgenommen. Verändert man einen physikalischen Parameter einer Farbe, so ändern sich meist zwei Empfindungsparameter. Erhöht man z.B. die Leuchtdichte eines Farbreizes, so ändert sich neben der

Helligkeit vielfach auch noch der Farbton. Dieses Phänomen heißt der BEZOLD-BRÜCKE-EFFEKT (Bezold, 1873; Brücke, 1878).

Verändert man die colorimetrische Reinheit eines Reizes, so ändern sich anschaulich neben der Sättigung auch noch die Helligkeit und der Farbton. Die Änderung des Farbtönen als Funktion der colorimetrischen Reinheit hat den Namen ABNEY-EFFEKT.

Je nach Ursache einer Farbänderung teilt man solche Effekte ein in

1. Farbverzerrung: Änderung der Farbvalenz einer Körperfarbe durch Änderung der beleuchtenden Lichtart.

Die Beobachtung, daß ein buntes Kleid unter künstlicher Beleuchtung anders aussieht als im Sonnenlicht, ist eine der bekannten Farbverzerrungen. Bei Beobachtung unter Maxwellian-View Bedingungen gibt es keine Farbverzerrungen.

2. Farbwandlung: Änderung der Farbempfindung, die allein durch eine Änderung des Anpassungszustandes (Adaptation) der Netzhaut an eine Farbverteilung im Gesichtsfeld bewirkt wird.

3. Farbverschiebung: Gleichzeitige Wirkung von Farbverzerrung und Farbwandlung.
(Definition des "Fachnormenausschuß Optik und optische Mechanik", 1977, Berlin).

Zusammenfassend kann folgendes gesagt werden:
 Der Farbton eines Reizes kann entweder durch eine
 Änderung der Intensität, der spektralen Zusammen-
 setzung des Reizes oder des Umfeldes beeinflusst
 werden. Bei meinen Versuchen habe ich die spek-
 trale Zusammensetzung der Reize (Experiment 1)
 oder das Umfeld der Farbreize (Experiment 3) oder
 beide Parameter gleichzeitig verändert (Experiment 2).

Projiziert man zu einem farbigen Testfeld ein
 weißes Umfeld, so verändert sich die Testfarbe
 sowohl in ihrem Farbton als auch ihrer Sättigung
 und Helligkeit (Valberg, 1975). Die Testfeldfarbe
 erscheint dunkler und gesättigter. Erhöht man die
 Umfeldleuchtdichte auf das Fünf- bis Zehnfache
 der Infeldleuchtdichte, so verschwindet der Farbton
 ganz, das Infeld erscheint schwarz. Diese Beobach-
 tung veranlaßte Hering, dafür das Wort SCHWARZVER-
 HÜLLUNG zu verwenden.

Das entgegengesetzte Phänomen wird beobachtet,
 wenn ein farbiger Reiz mit immer größeren Mengen
 Weißlicht gemischt wird: Die Farbe verblaßt, und
 bei genügend viel Weißlicht wird kein Farbton mehr
 wahrgenommen. Diesen Effekt nannte Hering WEISSVER-
 HÜLLUNG.

Es muß beachtet werden, daß die Begriffe Weiß-
 und Schwarzverhüllung auf der Empfindungsebene

definiert sind. Sie beschreiben die gesamte Veränderung einer Farbe, also Änderung von Farbton, Sättigung und Helligkeit. Der Bezold-Brücke-Effekt und der Abney-Effekt dagegen kennzeichnen nur die Farbtonänderung als Funktion der Helligkeit bzw. Sättigung. Der Abney-Effekt ist also ein Teilaspekt der Weißverhüllung.

Die Farbtöne, die in einem Spektrum unterschieden werden können, nennt man Spektralfarben. Jeder Spektralfarbe entspricht eine dominante Wellenlänge, die man auch den spektralen Farbort der Farbe nennt. Dies gilt auch dann, wenn ein monochromatischer Reiz mit Weißlicht "verdünnt" wird. Die Definition des spektralen Farbortes ist bisher von der DIN-Kommission noch nicht übernommen worden, vermutlich um Verwechslungen mit dem "Farbort im CIE-Diagramm" auszuschließen.

Zur Vereinfachung werde ich statt "spektraler Farbort" nur "Farbort" schreiben und dies so definieren:

Der FARBORT einer monochromatischen Farbe ist die Hauptwellenlänge des Farbreizes, unabhängig von seiner Sättigung.

Ist ein anderer Farbort gemeint, werde ich "Farbort im CIE-Diagramm" schreiben.

Arbeitet man mit monochromatischen Lichtern, so ist es zweckmäßig, Veränderungen des Farbtones als Verschiebung des Farbtortes zu messen, da die Hauptwellenlänge der Farben bekannt sind. Die Farbtonänderung kann daher als $\Delta\lambda$ in nm angegeben werden.

Im Spektrum gibt es 4 Farben, welche empfindungsmäßig rein sind. Rein heißt, daß sie keine Beimengungen eines anderen Farbtones haben und sich paarweise in ihrer Empfindung ausschließen. Es sind dies Blau, Grün, Gelb und Rot. Es gibt also kein gelbliches Blau, kein grünliches Rot und umgekehrt. Hering nannte diese Farben URFARBEN. Die restlichen Farben heißen Zwischen- oder Mischfarben.

1.2. Der Abney-Effekt

Westphal (1909) beobachtete, daß sich der Farbton einer Farbe ändert, wenn diese in ihrer Sättigung verändert wurde. Sir Abney bestimmte diesen Effekt im Jahre 1913 quantitativ. Er verwendete monochromatische Lichter, die er mit Weißlicht mischte, um so deren Sättigung zu verringern. Die Versuchsperson (Vp) verglich den weniger gesättigten Reiz mit einem Spektralreiz, der in seiner Wellenlänge solange verändert wurde, bis zwischen beiden Testfeldern wieder FARBTONGLEICHHEIT herrschte. Die Farbtonänderung konnte so als Farbortverschiebung in nm gemessen werden (Abb. 1/1).

Quantitative Messungen hat Abney nur im lang- und mittelwelligen Bereich vorgenommen. Die beobachteten Veränderungen im kurzwelligen Spektralbereich wurden qualitativ beschrieben. Eine genaue Beschreibung des Versuchs folgt in Kapitel 2.

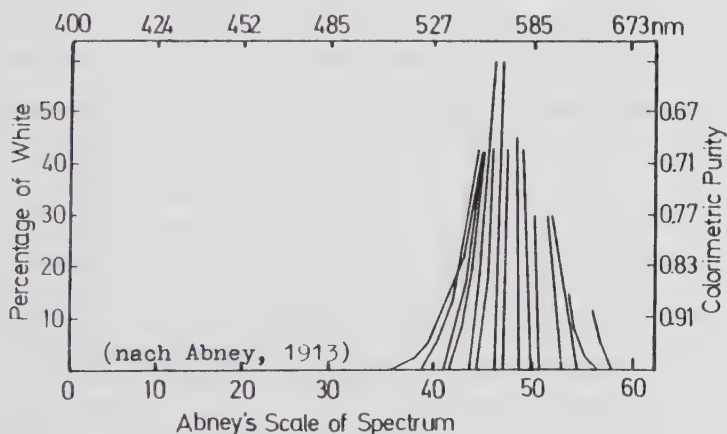


Abb. 1/1: Farbortverschiebung von 15 Farbtönen (grün - rot) als Funktion der Colorimetrischen Reinheit P_c (Definition von P_c Seite 40).

Jede der in Abb. 1/1 gezeichneten Linien entspricht einem Farbton und seiner Farbortverschiebung bei abnehmender Sättigung. Die Farbtöne reichen von grün bis rot, und es ist deutlich erkennbar, daß alle Kennlinien auf eine Wellenlänge um 570 nm (gelb) zulaufen. Dies bedeutet, daß Gelb

seinen Farbort und damit auch seinen Farbton nicht ändert, grünliche und rötliche Farben dagegen gelblicher werden, wenn sie mit "Weißlicht" gemischt werden.

Abney faßt seine qualitativen Ergebnisse so zusammen:

"In the red... it was seen that the hue was changing and that the mixed light was certainly yellower than the original colour. When the patches were orange, the colour became decidedly yellow, and this change in hue continued until 577.2 nm were reached, when no change in hue could be noticed.

Passing the slit into the yellow-green, the colour lost much of its green, and when full green was under examination the green became a yellow-green. All through the green part of the spectrum this yellowing was apparent, and in the blue-green, as far as 508.5 nm, the colour appeared to shift in hue towards yellow. In the true blue-green, about 488.6 nm, the addition seemed to make no difference in hue, simply making it appear rather paler.

At 477.6 nm the mixture of colour and white made the blue become redder. In the violet, the addition of white caused the colour to become redder."

Als Weißlicht verwendete Abney das Licht einer Kohlebogenlampe, welches eine Farbtemperatur von

3 980 K hatte (schriftliche Mitteilung von Dr. Wooten). Professor Wright, der im Labor von Abney am Imperial College gearbeitet hat, teilte mir mit, die Farbtemperatur hätte in der Region von 3.700 K gelegen. Dies entspricht der Farbtemperatur gebräuchlicher Kohlebogenlampen. Die Farbtemperaturen von Lichtquellen werden mit einer Unsicherheit von ± 150 K angegeben (Auskunft Fa. OSRAM), so daß beide Werte als genau genug gelten können. Weißlichter mit 3.700 K und 3.980 K sind nur für einen geübten Beobachter unterscheidbar.

Dieses, von Abney verwendete "Weißlicht" sieht im Vergleich mit neutralen Weißlichtern deutlich gelb aus. Abney versuchte, die von ihm gefundenen Farbtonverschiebungen mit der Zerlegung seines Weißlichtes in einen Rot- und Grünanteil zu erklären, konnte jedoch nur eine Übereinstimmung im langwelligen Bereich finden. Da diese Hypothese nur einen Teil der Ergebnisse erklären kann, ist es fraglich, ob sie überhaupt zutrifft. Das auffällige Zusammenlaufen aller mittel- und langwelligen Farben auf Gelb läßt eher vermuten, daß der gelbe Farbton des Mischweißes die Ursache der Farbtonänderung ist und nicht die Wirkung von Weiß auf nur einen Farbkanal.

Lange Zeit wurde Wolfram-Licht als Standardweiß verwendet, und noch heute ist die ÄQUIVALENTE

LEUCHTDICHTE auf Wolfram-Licht von 2.042 K bezogen. Obwohl der gelbe Farbton eines solchen Lichtes kurz nach dem Einschalten gut wahrgenommen wird, erscheint es schon nach wenigen Minuten oder gar Sekunden farbneutral (Jameson und Hurvich, 1964). Der Grund ist die Farbanpassung des Auges. Eine solche Anpassung verändert die Wahrnehmung von Farben (Farbwandlung).

Hurvich und Jameson zeigten 1951 in einer umfangreichen Studie, daß der Farbtort eines Neutralweiß im CIE-Diagramm mit der Darbietungszeit, der Reizgröße, der Adaptation und dem Netzhautort variieren. Unter einem Neutralweiß versteht man ein Weiß, welches keinen Farbton enthält, also weder bläulich, grünlich, gelblich oder rötlich ist. Verschiedene Vpn haben meist unterschiedliche Neutralweißorte im CIE-Diagramm. Der Grund hierfür dürften Unterschiede in den Pigmenten der Zapfen und dem Maculapigment sein (Alpern, 1975).

Daneben hängt der Farbtort noch von langandauernden Adaptationszuständen ab, wie dem Jahreszeitenwechsel (Richter, 1951) oder auch tageszeitlichen Schwankungen (Knoerchen und Hildebrandt, 1975). Auch mit dem Alter einer Vp ändert sich der Neutralweißort. Normalbeobachter mittleren

Alters liegen mit ihrem Neutralweißort zwischen 6.500 K und 7.500 K im CIE-Diagramm.

Ich habe keine Arbeit gefunden, in welcher Abneys Versuch mit Neutralweiß wiederholt worden wäre. In den Handbüchern werden zu diesem Effekt nur die beiden Arbeiten Abneys zitiert (Abney, 1910/1913). Larimer bedauert in seiner Untersuchung zu den "unveränderlichen Farben", daß es bis heute keine präzisen Angaben über die Abney-Farbverschiebung gäbe, obwohl sicher sei, daß die Art des verwendeten Weißlichtes kritisch sei.

Mit meiner Arbeit liegen jetzt Daten zur Weiß- und Schwarzverhüllung vor, die sowohl mit Wolfram-Weißlicht als auch mit individuellen Neutralweißlichtern gewonnen wurden. Daneben wurden zwei bläuliche Weißlichter verwendet. Außerdem wurde noch eine Konfiguration untersucht, die beide Bedingungen enthielt.

Versuche der Farbtonänderungen lassen sich in drei Gruppen einteilen: Versuche mit Farbpapieren, Farbmischversuche und Farbe-plus-Weiß Versuche. Für Farbmischversuche wählt man drei Ausgangsfarben (Primärfarben) aus, in der Regel je eine aus dem blauen, grünen und roten Spektralbereich. Durch Mischen der Primärfarben kann jeder Farbton

in jeder beliebigen Sättigung erzeugt werden. Diese Farbtöne sind nicht durch eine Hauptwellenlänge charakterisiert, sondern durch das Mischungsverhältnis der drei Primärfarben.

Bei Farbe-plus-Weiß Experimenten wird eine Spektralfarbe durch Mischung mit Weißlicht in ihrer Sättigung verändert. Unter diesen Bedingungen könnten Farbänderungen von der Art des Weißlichtes abhängen.

MacAdam (1950) hat die Linien gleichen Farbtönen für 12 Farben in einem Farbmischexperiment gemessen. Valberg (1971) hat solche Daten für die vier Urfarben veröffentlicht. Auch für die Munsell-Farbpapiere gibt es die Linien gleichen Farbtönen im CIE-Diagramm (Wyszecki und Stiles, 1967). Diese wurden mit farbtongleichen Papieren auf grauem Hintergrund gemessen. Papiere und Hintergrund wurden dabei mit künstlichem Tageslicht (7.000 K) beleuchtet.

Die Farbortkurven im CIE-Diagramm lassen sich geometrisch in Farbortverschiebungskurven umwandeln, die dann der Darstellung Abneys entsprechen. Aus diesen Kurven kann der Einfluß eines bestimmten Weißlichtes bei einer Sättigungsänderung nicht entnommen werden. Die Kurven geben die Verschiebung des Farbortes einer Farbe bei der Änderung der Primärfarbenmischung an, ohne die Beteiligung von Weißlicht.

Um den Einfluß verschiedener Weißarten auf diese Farbortverschiebung messen zu können, muß die Spektralfarbe-plus-Weiß Methode gewählt werden. Zum Vergleich habe ich die vom Weißlicht unabhängigen Meßwerte von MacAdam herangezogen, der ebenfalls mit einem dunklen Umfeld gearbeitet hat (Kapitel 5.3).

Der erste Versuch zum Abney-Effekt sollte folgende Fragen klären:

1. Können die Ergebnisse Abneys unter standardisierten Bedingungen bestätigt werden?
2. Wie sehen Farbortverschiebungen in dem von Abney nicht untersuchten kurzwelligen Teil des Spektrums aus?
3. Wie verhalten sich verschiedene Weißlichter in Bezug auf diese Farbortverschiebungen?
4. Gibt es ein Weißlicht, welches keine Farbortverschiebungen hervorruft?
5. Gibt es Farbtöne, die keine Farbortverschiebung erfahren, wenn sie in ihrer Sättigung mit Weißlicht verändert werden (unveränderliche Farben)?

1.3. Schwarzverhüllung

Unter Schwarzverhüllung versteht man die Veränderung einer Farbe, wenn die Leuchtdichte des achromatischen Umfeldes ist die Schwarzverhüllung ein Spezialfall des Flächenkontrastes. Handelt es sich um ein weißes Infeld, so heißt das Phänomen "Simultaner Helligkeitskontrast".

Alle diese Begriffe bezeichnen ein Empfindungsphänomen, nicht eine physikalische Leuchtdichteverteilung. Der Oberbegriff Binnenkontrast ist so definiert:

Binnenkontrast ist die Empfindung, die ein Normalbeobachter bei der Betrachtung eines Feldes gleichmäßiger Leuchtdichte hat, wenn dieses sich in einem Umfeld abweichender Leuchtdichte befindet (Fachnormenausschuß, 1975).

Dabei erscheinen helle Infelder in dunkler Umgebung aufgehellte, dunkle Infelder in hellem Umfeld dunkler (Heggelund, 1971).

Bei farbigem Infeld nimmt man nicht nur eine Helligkeitsveränderung wahr, die Farbe erscheint bei zunehmender Umfeldleuchtdichte auch gesättigter (Pitt und Winter, 1974). Daneben verändert sich auch die Erscheinungsform des farbigen Feldes. Bei dunklem Umfeld scheint es zu leuchten (Trans-

parenzfarbe), in hellem Umfeld hat es den Charakter einer Oberflächenfarbe (Körperfarbe).

Unter den Bedingungen der Schwarzverhüllung ändern sich außer Helligkeit und Sättigung auch der Farbton des Infeldes (Valberg, 1975). Dabei können neue Farben entstehen, die im Spektrum nicht vorkommen. Schon Goethe (1810) nannte solche Farben "Kontrastfarben". Schober (1958) formulierte folgende Regel:

"Die Farbtöne Schwarz, Braun und Olivgrün kommen nur durch Kontrastwirkung zustande. Das Aussehen von Grau und Weiß wird wesentlich durch den Kontrast beeinflusst. Die Farbtöne Schwarz, Braun, Olivgrün und Grau können daher nur als Pigmentfarben in andersfarbiger Umgebung, niemals aber als farbige Lichter wahrgenommen werden."

Während Künstler schon seit Jahrhunderten dieses Phänomen kannten und einsetzten, wurde es bis in die Mitte des vorigen Jahrhunderts wissenschaftlich nicht untersucht. Erst als Farbkonstanzprobleme beim Weben von farbigen Baumwollfasern auftraten, bekam Chevreul den Auftrag, solche Wechselwirkungen systematisch zu untersuchen (Chevreul, 1832). Daraufhin setzte eine Welle der Kontrastforschung ein. Dabei wurden jedoch ausschließlich der simultane Helligkeits- und

Farbkontrast untersucht (Tschermak, 1903). Die Farbtonänderungen bei Schwarzverhüllung wurden nur qualitativ beschrieben.

Als mit der Farbfotografie und dem Farbfernsehen das Problem der konstanten Farbproduktion in noch stärkerem Maße wirtschaftlich wichtig wurde, nahm auch die Anzahl der Veröffentlichungen zu, die sich mit Schwarzverhüllung befaßten.

Viele Arbeiten entstanden in Industrielabors (MacAdam, 1950, 1951; Godlove, 1951; Hunt, 1952, 1953, 1965; Burnham et al., 1957; Pitt und Winter, 1974; Breneman, 1962, 1977). Eine Untersuchung mit monochromatischen Lichtern, in welcher die Veränderung des Farbtones als Änderung der Wellenlänge gemessen wurde, fehlt allerdings bis heute. Dagegen liegen viele Ergebnisse zur Veränderung von Sättigung und Helligkeit als Funktion der Umfeldleuchtdichte vor.

Deshalb habe ich im zweiten Teil meiner Arbeit überprüft, ob auch unter den Bedingungen der Schwarzverhüllung eine Farbortverschiebung auftritt, wobei die Parameter Sättigung und Helligkeit unberücksichtigt blieben. Alle Untersuchungen fanden unter den gleichen Bedingungen wie die Versuche zum Abney-Effekt statt.

2. VERSUCHSAUFBAU UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

2.1. Das Maxwellian-View-System

Alle Versuche wurden mit einem Dreikanal-Maxwellian-View-System durchgeführt. Abb. 2/1 zeigt einen schematischen Plan der Strahlengänge.

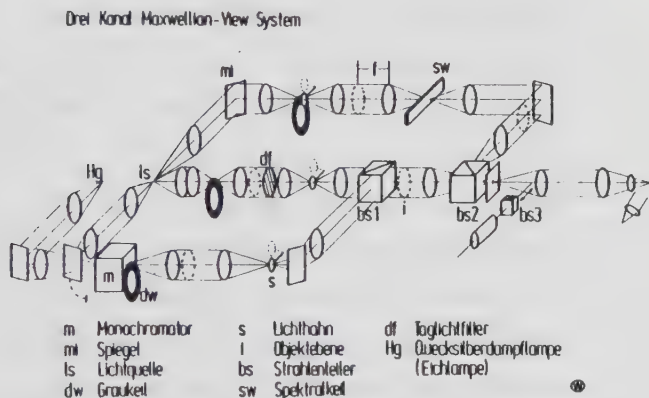


Abb. 2/1: Aufbau des Maxwellian-View-Systems.

Die Bezeichnung "Dreikanal" bezieht sich auf die drei, in der Zeichnung waagrecht aufgetragenen Strahlengänge. Ich werde sie von unten nach oben mit Strahlengang 1, 2 und 3 benennen. Alle 3 Strahlengänge haben eine gemeinsame Lichtquelle (ls), die von einem gleichstromstabilisierten Netzgerät gespeist wurde. Die Wendel der Sylvana Wolframlampe war zylindrisch und im Lampengehäuse senkrecht

justiert. Dadurch konnte nach allen Seiten das gleiche Wendelbild abgebildet werden, und es herrschte gleicher Strahlenfluß. Die Lampe hatte 45 Watt, die Betriebsstromstärke war 6.4 A. Alle 3 Öffnungen des Lampengehäuses waren mit Hitzefiltern versehen (Schott, KG 2). Ausgehend von dieser Lichtquelle wurden 3 Strahlengänge aufgebaut, für die mit Ausnahme der Oberflächenspiegel (mi) die gleiche Anzahl optischer Komponenten verwendet wurde. Es wurden Linsen der gleichen Art (Achromate, Spindler und Hoyer) mit gleicher Brennweite verwendet. Die unterschiedliche Länge der Strahlengänge wurde innerhalb der parallelen Strahlenteile ausgeglichen, nicht mit Hilfe zusätzlicher Komponenten. Dadurch konnten gleiche Testfelder ohne schwierige Helligkeits- und Farb Anpassungen hergestellt werden.

Im ersten Strahlengang wurde monochromatisches Licht hergestellt. Das Licht wurde auf den Eingangsschlitz eines Jarrel-Ash-Monochromators fokussiert. Als Spaltbreite wurde 1mm gewählt, um eine Halbwertbreite des Lichtes von 4 nm zu erhalten. Bei dieser Halbwertbreite kann eine farbnormale Vp noch Wellenlängenunterschiede von 1 - 4 nm als Farbtonunterschied wahrnehmen. Andererseits ist noch genügend Intensität vorhanden, um auch im kurzwelligen Bereich unter photopischen Bedingungen zu arbeiten.

Im zweiten Strahlengang wurden Weißlichter unterschiedlicher Farbtemperatur hergestellt. Die Lampe liefert ein Licht von 2.800 bis 3.000 K (Firmenangabe). Dieses Licht wurde mit Kodak "Light Balancing Filters", "Daylight Conversion Filters" (CC-Filter) und "Photometric Filter" in seiner Farbtemperatur und damit auch seinem Farbton verändert. Die Feinabstimmung der Weißlichter entlang der Farbtemperaturlinie (gelb-blau) und entlang der Linien gleicher Farbtemperatur (magenta-grün) wurde mit Kodak CC-Filtern gemacht.

Der dritte Strahlengang lieferte bei eingesetztem Schott Spektralkeil (sw) ebenfalls monochromatisches Licht. In meinem Versuch diente er zur Projektion eines Fixationskreuzes. In jedem Strahlengang konnte mittels stufenloser Graukeile (Barr und Stroud) die Leuchtdichte unabhängig eingestellt werden. Mit drei Magnetverschlüssen konnte die Darbietungszeit der Reize eingestellt werden.

Jeder Strahlengang hatte mindestens eine Objektebene. Jedes Bild in einer Objektebene wird bei Akkommodation auf unendlich scharf auf der Netzhaut abgebildet. Da 5 Objektebenen vorhanden waren, konnten komplizierte geometrische Reize zusammen-

gesetzt werden. Dem Problem schwarzer oder farbiger Ringe bei gemeinsamen Bildkanten aus verschiedenen Strahlengängen wurde begegnet, indem alle veränderlichen Komponenten (Graukeile, Monochromator) vor die Objektebenen gelegt wurden.

Strahlengang 1 und 2 wurden mit dem Strahlenteiler 1 (bs 1) vereinigt. Strahlenteiler 2 vereinigte diesen gemeinsamen Strahl mit dem dritten Strahlengang. Danach wurden alle 3 Wendelbilder scharf auf der gemeinsamen Blende (letzter Spalt) abgebildet. Der Blendendurchmesser war 1.8 mm, was einer Blendengröße von 2.2 mm^2 entspricht.

Strahlengang 1 und 2 hatten noch eine gemeinsame Objektebene unmittelbar nach dem Strahlenteiler 1. Gemeinsame Reizkanten, die dort durch ein Bild entstanden, waren optisch "sauber", ohne die sonst übliche schwierige Justierung. Durch diese Anordnung wurden auch Randunschärfen, Streulicht und Doppelbilder weitgehend vermieden.

Bei Beobachtung unter Maxwell-Bedingungen fällt der letzte gemeinsame Brennpunkt mit der Pupillenmitte des Beobachters zusammen. Die Größe des letzten Spaltes legt, bei gleicher Brennweite der letzten beiden Linsen, die Größe des letzten

Brennpunktes im Auge fest. Der Durchmesser von 1.8 mm gewährleistet, daß kein Licht durch die Iris ausgeblendet wurde, selbst wenn die Pupille ihren kleinsten Durchmesser von 3 mm annahm. Um den Lichtstrahl immer zentriert zu halten, mußte der Kopf der Vp ruhig gestellt werden. Dazu biß die Vp auf ein Beißbrett, welches an einem X-Y-Z-Verschiebetisch montiert war. Bei gleichzeitiger Fixation des Reizes konnte so das Auge der Vp zentriert werden. Dazu wurde noch ein weiterer Strahlenteiler (bs 3) in den letzten Strahlengang geschoben. Durch ein Zoomobjektiv mit Fadenkreuz konnten dann Brennpunkt und Pupillennitte beobachtet und zur Deckung gebracht werden. Alle Versuche wurden monokular mit dem rechten Auge vorgenommen.

2.2. Eichung des Maxwellian-View-Systems

Vor und nach jedem Versuch wurde die Leuchtdichte gemessen und falls nötig geeicht. Dies geschah einmal direkt an der Stelle des Auges und, in größeren Abständen, fotometrisch (Abb. 2/2).

Bei der direkten Messung befand sich eine Fotozelle (PIN Silicon Photodiode) an der Stelle des Auges. Das Signal wurde mit einem UDT 80X Optometer verstärkt. Die Eichung der Spektrallichter

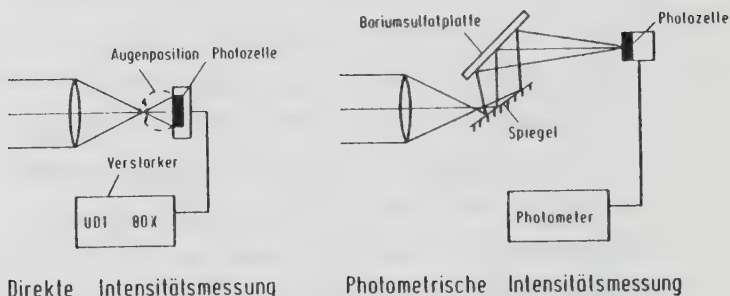


Abb. 2/2: Direkte und indirekte Intensitätsmessung

erfolgte mit einem radiometrischen Filter (μW -Skala), die der Weißlichter mit einem fotometrischen Filter (footcandle-Skala). Die Anzeigegenauigkeit betrug $\pm 5\%$ des Eichwertes.

Die Eichung der Wellenlängen von Monochromator und Interferenzfilter erfolgte mit einer Quecksilber-Halogenleuchte und zwei Lasern. Dazu wurden die Lichtstrahlen auf den Eingangsschlitz des Monochromators (Kanal 1) oder des Spektralkeils (Kanal 3) fokussiert. Als Spaltbreite wählte ich 0.15 mm , was eine Eichung auf $\pm 1 \text{ nm}$ ermöglichte (Abb. 2/3). Als Eichwellenlängen wurde das Grünband (546.1 nm) und das Gelbband (577 nm) der Halogenlampe verwendet. Die Laser hatten eine Wellenlänge von 440.2 und 633 nm .

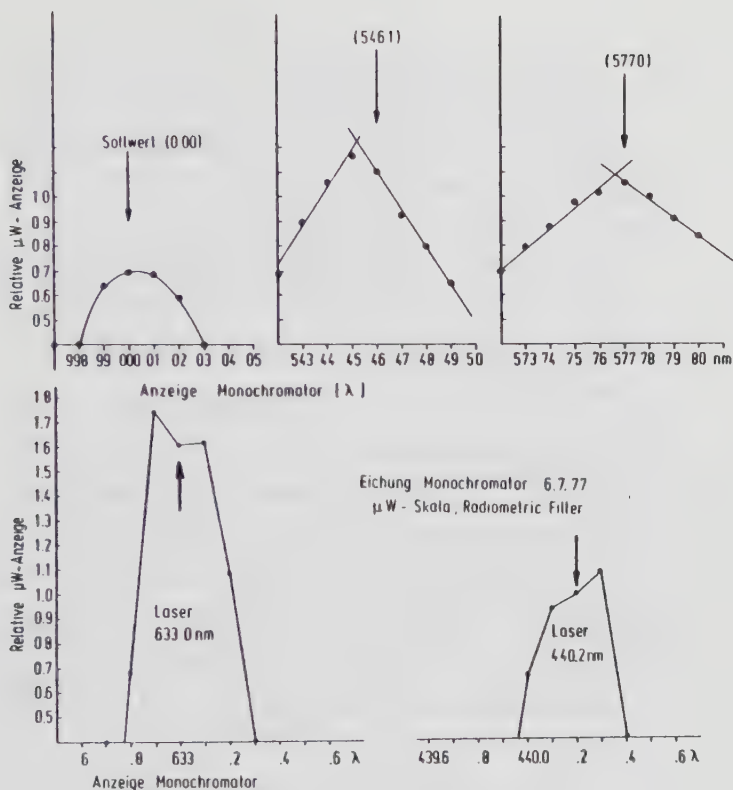


Abb. 2/3: Eichung des Monochromators

2.3. Versuchsmethodik

Zur Ermittlung der Weißorte sowie der Farborte für die Ur- und Zwischenfarben wurden die gleichen Versuchsbedingungen gewählt:

Vor jedem Versuch hielt sich die Vp 20 Minuten im Dunkeln auf. Während des Versuchs saß sie in einer lichtundurchlässigen Kabine. Alle Reize wurden

auf einem dunklen Hintergrund dargeboten. Alle Messungen erfolgten also bei dunkeladaptiertem Auge. Die Vp fixierte die Mitte eines Fixationskreuzes.

Das Testfeld war eine runde Scheibe von 0.5 Grad Gesichtswinkel. Diese Testfeldgröße gewährleistete, daß der Reiz selbst mit konzentrischem Umfeld (1 Grad) auf die Fovea beschränkt blieb. Foveale Testfelder ab 0.5° werden durch Simultankontrast gleichmäßig verdunkelt, unter dieser Bedingung hängt der Kontrast nur von der Größe des Umfeldes und dem Leuchtdichteunterschied zwischen In- und Umfeld ab (Torii und Uemura, 1965). Dies macht die Ergebnisse gut mit anderen Arbeiten vergleichbar.

Das Testfeld wurde alle 19 Sekunden für 1 Sekunde dargeboten. Diese Zeit ist zu kurz, um die Empfindlichkeit des Sehsystems zu verändern (Hering, 1920; Schouten und Ornstein, 1939), jedoch lang genug, um nicht mehr in die ca. 200 ms lange Alpha-Adaptation zu fallen (Hartmann, 1968). Der Farbton und damit der Farbart einer Farbe ändert sich bei Darbietungszeiten zwischen 10 und 100 ms bis zu 12 nm (Nilsson, 1972). Längere Zeiten verändern den Farbart nur noch unwesentlich. Eine Sekunde genügt auch, der Vp ein subjektiv sicheres Urteil über den Farbton zu ermöglichen (Hurvich und Jameson, 1951). Nachbilder traten nicht auf.

Im allgemeinen wurden bei einem Versuchsdurchgang 10, im Farbton ähnliche, Testreize je sechsmal in zufälliger Reihenfolge gegeben. Es waren also 60 Entscheidungen in 20 min nötig, um einen Farbort zu bestimmen. Insgesamt wurden 63.000 Entscheidungen ausgewertet.

2.4. Versuchspersonen

Die Versuche zur Bestimmung der Neutralweißorte wurden mit 5 Vpn gemacht, alle weiteren Versuche mit 3 Vpn. Zwei dieser Vpn waren naive Beobachter. Alle Vpn wurden von der Freiburger Augenklinik am Nagel'schen Anomaloskop auf ihre Farbtüchtigkeit untersucht. Die gemessenen Farbdaten waren:

$$\text{Vp WK : } \quad \frac{40 - 41}{14} \quad \frac{39 - 44}{14}$$

$$\text{Vp TLA : } \quad \frac{45 - 52}{14} \quad \frac{39 - 46}{15}$$

$$\text{Vp GH} \quad \frac{45 - 47}{14} \quad \frac{44 - 49}{15}$$

$$\text{Normal: } \quad \frac{32 - 48}{14} \quad \text{Normalitätsbereich: } \frac{30 - 50}{14}$$

3. VORVERSUCHE

3.1. Bestimmung des individuellen Neutralweiß

Da der Einfluß verschiedener Weißarten auf den Farbton monochromatischer Reize gemessen werden sollte, mußte auch ein reines Weiß für jede Vp ermittelt werden. Mit den vorher genannten Filtern wurde die Farbtemperatur des Wolfram-Lichtes von 3.000 K (gelblich) bis 20.000 K (bläulich) verändert (Abb. 3/1).

Der Vp wurden 10 Weißlichter, die im Farbton von gelblich nach bläulich reichten, im Abstand von 19 s für die Dauer von 1 s dargeboten. Jeder Reiz wurde 6 mal gezeigt, die Reihenfolge war zufällig. Die Vp hatte die Aufgabe, nach jeder Darbietung den Reiz entweder mit "bläulich" oder mit "gelblich" zu bezeichnen, andere Antworten waren nicht zugelassen. Abb. 3/2 zeigt die Ergebnisse für 3 Vpn.

PLANCKSCHER KURVENZUG

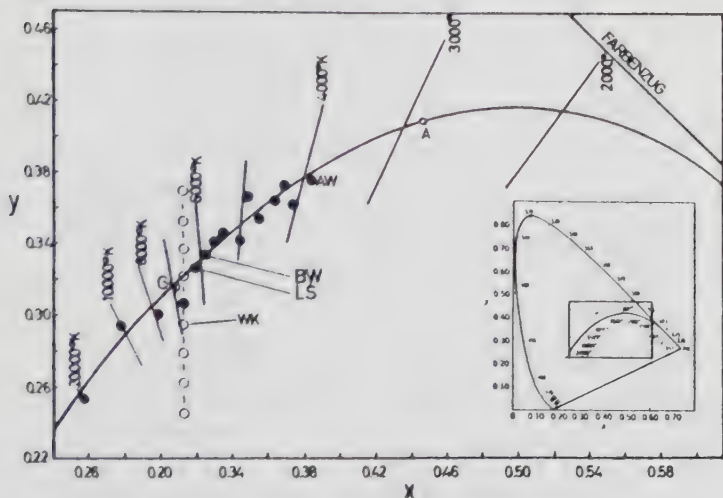


Abb. 3/1: Farborte der verwendeten Weißlichter

im CIE-Diagramm. Das eingeraumte Feld
im Einschub ist vergrößert dargestellt.

A = Wolfram-Licht, AW = Abneys Weißlicht,

C = Normalweiß (Tageslicht)

WK, BW, LS = Neutralweißarten der 3 Vpn

Auf Reize von mehr als 10.000 K gaben alle Vp die
Antwort "bläulich", auf Reize mit weniger als
5.000 K ausschließlich die Antwort "gelblich".

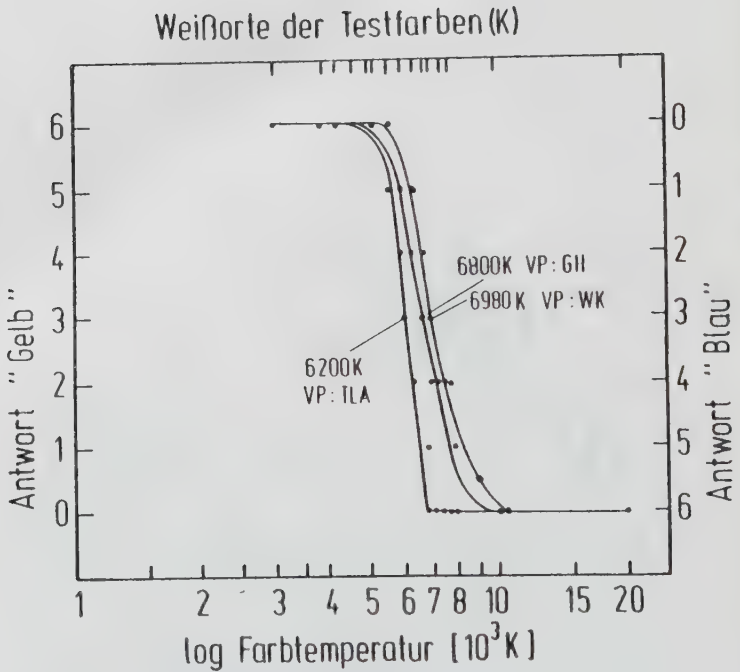


Abb. 3/2: Verteilung der Antworten der Vpn auf Weißlichter unterschiedlicher Farbtemperatur. Eingezeichnet sind die Weißarten, bei denen die Antworthäufigkeit gleich war.

Da die gemessenen Kurven selten symmetrisch waren, mußte der Ort gleicher Antworthäufigkeit zeichnerisch oder rechnerisch ermittelt werden.

Am Anfang habe ich die gefundenen Werte in eine Hill-Gleichung eingesetzt und so eine sigmoide Funktion durch diese Punkte erhalten. Der Schnitt-

punkt dieser Funktion mit der Linie gleicher Antworthäufigkeit ergab den gesuchten Farbort.

Als ebenso genau, aber einfacher, erwies sich der Schnittpunkt einer Regressionsgeraden durch alle Punkte mit Mischantworten und der Geraden gleicher Antworthäufigkeit. Für die Auswertung aller Experimente habe ich dann das zweite Verfahren gewählt.

Die bisher bestimmten Weißlichter waren bezüglich der Farbtöne blau und gelb farbneutral. Diese Weißlichter wurden nun entlang einer Rot-Grün-Achse variiert. Dazu verwendete ich rote und grüne CC-Filter. Bei dieser Farbtonänderung blieb die Farbtemperatur gleich (Verschiebung auf einer Judd-Geraden). Dann wurde das vorher beschriebene Experiment wiederholt. Das nach diesen beiden Durchgängen ermittelte Weiß war ein farbneutrales, individuelles "Urweiß", das ich "individuelles Neutralweiß" nenne (INW).

Folgende Neutralweißorte wurden gemessen:

Vp BW : 6.200 K

Vp GH : 6.800 K, Grünkorrektur 05 M

Vp LS : 5.900 K

Vp TLA : 6.200 K, Rotkorrektur 10 G

Vp WK : 6.980 K, Grünkorrektur 05 M

Sah für eine V_p das auf dem Planckschen Kurvenzug liegende Weiß rötlich aus, so wurde mit einem grünen CC-Filter (05 G, 10 G, usw.) kompensiert, sah es grünlich aus, mit einem roten Filter (05 M, 10 M, usw.).

Die gefundenen Ergebnisse stimmen mit den Befunden anderer Autoren gut überein (Valberg, 1971).

3.2. Herstellung gleichheller monochromatischer Reize

Energiegleiche farbige Reize werden nicht als gleichhell wahrgenommen. Um gleichhelle Farbreize zu erhalten, bedient man sich der international definierten V_λ -Kurve. Diese Kurve gibt an, welche Energie monochromatische Reize im Vergleich zu einem Standardreiz haben müssen, um gleich hell gesehen zu werden. Die V_λ -Kurve ist eine Durchschnittskurve mehrerer Helligkeits-Empfindlichkeitskurven, welche mit verschiedenen Methoden gewonnen wurden.

Hauptsächlich beruht die V_λ -Kurve auf Flimmerphotometrie-Experimenten und ist für Abgleichexperimente nicht geeignet (Bauer, 1975). Die Werte im kurzwelligen Bereich unterscheiden sich erheblich von denen, die mit einer heterochromatischen Abgleichsmethode oder mit der Schritt-für-Schritt Methode gemessen werden (Bauer und Röhler,

Derzeit verbindlich ist die 1964 anerkannte Funktion, die mit einem 2° großen Feld foveal gemessen wurde (Wysecki und Stiles, 1967; DIN-Blatt 5031/2).

Da ich meine Reize sukzessive für 1 s dargeboten habe, lag es nahe, nicht eine Durchschnittskurve oder gar die Empfindlichkeitskurve zu nehmen, die mit Flicker gewonnen wurden. Ich legte daher meinen helligkeitsgleichen Einstellungen eine Kurve zugrunde, die mit der Schritt-für-Schritt Methode ermittelt wurde. Die neueste spektrale Empfindlichkeitskurve dieser Art wurde 1972 von Wagner und Boynton veröffentlicht (siehe Abb. 3/3).

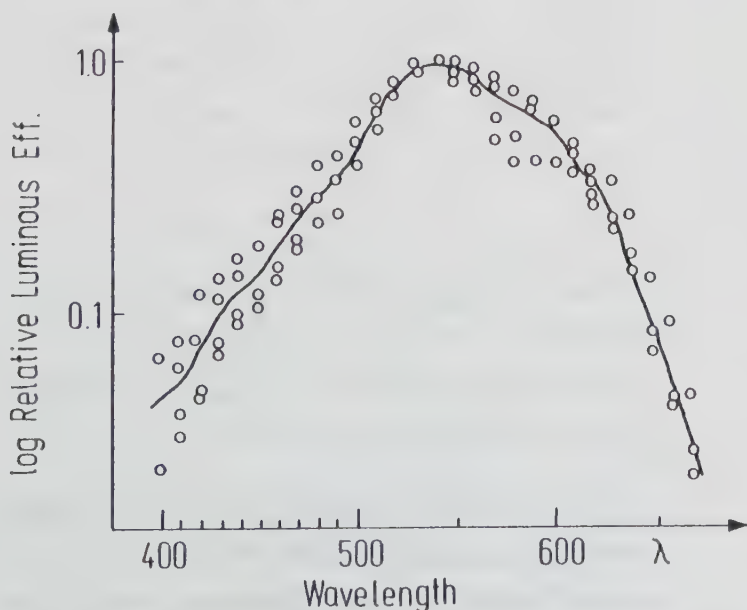


Abb. 3/3: Normalisierte spektrale Empfindlichkeitskurve, die mit der Schritt-für-Schritt Methode er-

Die gezeichnete Kurve ist die bestmögliche Anpassung an die Ergebnisse von 4 Beobachtern, also ebenfalls eine Durchschnittskurve wie die V_{λ} -Kurve. Genauere Kurven sind psychophysisch nicht zu erhalten, da heterochromatische Helligkeitsabgleiche auch für geübte Vpn schwer sind. Die Wahrnehmungsgröße Helligkeit (brightness) wird gemessen als Leuchtdichte (luminance), die gebräuchlichste Maßeinheit ist candela/m^2 . Die Meßgröße Leuchtdichte ist über V_{λ} definiert. Da ich eine andere V_{λ} -Kurve benützt habe, besitzen alle gleichhellen Testreize unterschiedliche Leuchtdichten. Das Maxwellian-View-System wurde auf die neue Funktion geeicht. Um Verwechslungen auszuschließen, bezeichne ich die von Wagner und Boynton gemessene Kurve mit V_{λ}^* . Die auf diese Kurve bezogenen Leuchtdichten mit L^* . Es gilt:

$$L^*_i = L_i (V^*_i / V_i) \quad i = \text{nm}$$

Der Wert $L^*_{(580)}$ wurde wie bei der V_{λ} -Kurve auf 1 normiert, so daß gilt $L_{(580)} = L^*_{(580)}$.

Die Weißlichter gleicher Helligkeit wurden mit dem Gelb von 580 nm abgeglichen.

Bei Maxwell-Beobachtung wird der Lichtstrahl in das Auge projiziert. Da der Reiz nicht auf einer Oberfläche abgebildet wird, kann die Leuchtdichte nicht direkt mit dem Photometer gemessen

werden (siehe Abb. 2/2). Um dennoch die retinale Beleuchtung zu messen, wird der Lichtstrahl auf eine Bariumsulfatplatte geworfen und dort die Leuchtdichte gemessen. Die Anzeige erfolgte in Millilambert (mL). Die Umrechnung auf Troland (Trol) erfolgte mit der Westheimer-Formel (Westheimer, 1966).

$$\text{Westheimer-Formel: } E = 10^7 B x^2 / r$$

E = retinale Beleuchtungsstärke

B = Leuchtdichte auf der BaSO_4 -Platte in mL

x = Entfernung der Platte vom letzten Brennpunkt

r = Reflektionskoeffizient ($\text{BaSO}_4 = 99\%$)

Die retinale Beleuchtungsstärke (I_p) wird in Troland gemessen. Ein Troland ist die Leuchtdichte 1 cd/m^2 , betrachtet durch eine künstliche Pupille von 1 mm^2 Fläche.

$$I_p (\text{Trol}) = L \times A (\text{cd mm}^2/\text{m}^2)$$

Die Helligkeitsempfindung eines Reizes hängt auch noch vom Durchtrittsort des abbildenden Strahlenbündels in der Pupille ab (Stiles und Crawford, 1933). Der Effekt heißt Stiles-Crawford-Effekt. Je größer die von einem Strahlenbündel beleuchtete Pupillenfläche ist, desto schlechter ist das Verhältnis von eingestrahlter Beleuchtungsstärke und retinaler Beleuchtungsstärke. Berücksichtigt man

den Stiles-Crawford-Effekt, so muß man I_p noch mit einem Pupillenfaktor s multiplizieren. Man erhält dann die reduzierte retinale Beleuchtungsstärke I'_p . (Zur Berechnung von s siehe Moon und Spencer, 1944).

Für meine Versuchsbedingungen (Brennpunktdurchmesser in der Pupille 2.2 mm^2) beträgt $s = 0.96$. Dadurch würden sich die von mir verwendeten Leuchtdichten nur in der dritten Stelle nach dem Komma ändern. Ich gebe deshalb alle retinalen Beleuchtungsstärken als I_p an.

3.3. Herstellung farbiger Reize mit unterschiedlicher Sättigung

Sättigung ist eine Wahrnehmungsgröße und kann als Färbekraft einer Farbe beschrieben werden. Je weniger gesättigt eine Farbe ist, desto ähnlicher ist sie Weiß oder Grau. Farben gleicher Sättigung sehen gleich bunt aus, nicht jedoch gleich farbig, es sei denn, es handelt sich um die gleichen Farben. Monochromatische Farben sehen nicht gleich gesättigt aus. Gelb z.B. ist weißähnlicher als alle anderen Farben. Am gesättigsten sehen Rot und Violett aus (Hemminger, 1974).

Mischt man weißes Licht zu einem Spektrallicht, so werden die Farben unterschiedlich ausgebleicht, auch wenn die gleiche Menge Weißlicht zugemischt wird (Ebenhöh, 1976). Um diese Probleme zu umgehen, wurden in diesem Versuch nicht sättigungsgleiche Reize, sondern Reize gleicher colorimetrischer Reinheit (colorimetric purity, P_c) verwendet.

$$P_c = \frac{L_c}{L_c + L_w} \quad (1)$$

L_c = Leuchtdichte des farbigen Reizes

L_w = Leuchtdichte des zugemischten Weiß

Da ich eine $V\lambda^*$ -Kurve als Grundlage meiner Leuchtdichtemessungen verwendet habe, muß es in meinem Falle heißen:

$$P_c^* = \frac{L_c^*}{L_c^* + L_w^*}$$

P_c ist im Gegensatz zu Sättigung eine physikalische Größe, die sich so beschreiben läßt:

"Farben gleicher P_c haben das gleiche Leuchtdichteverhältnis von farbigem und weißem Licht. Sie müssen weder gleich hell noch gleich gesättigt aussehen".

Da bei meinen Untersuchungen der Weißgehalt einer Farbmischung als Parameter dienen sollte, war P_c das geeignete Maß.

3.4. Ermittlung der Farborte der reinen Farben

Bei allen Sättigungsexperimenten wurden sieben Farbtöne untersucht:

Drei Urfarben: Blau, Grün und Gelb. (Urrot als extraspektraler Reiz konnte nicht untersucht werden).

Vier Zwischenfarben: Rotblau, Blaugrün, Grüngelb und Gelbrot (Orange).

Nach der Methode der ersten Wahl hatte die Vp immer nur zwei Antworten zur Beurteilung der Farb- reize, diese waren auch das Kriterium. Das Kriterium der Urfarben war ihre farbliche Reinheit (Kriterium von Hering, 1887):

Blau: Weder rötlich noch grünlich

Grün: Weder bläulich noch gelblich

Gelb: Weder grünlich noch rötlich

Das Kriterium der Zwischenfarben war ein subjektives Mischungsverhältnis von 50 : 50. Blaugrün z.B. sollte als gleichanteilige Mischung aus Blau und Grün erscheinen. Überwog der blaue Eindruck, so gab die Vp die Antwort Blau, im anderen Falle Grün.

Die Wellenlängenunterscheidung des Menschen ist nicht im gesamten Spektrum gleich gut. Sie hängt ab vom Adaptationszustand, dem Netzhautort und der Reiz-

größe (Weale, 1953). Für die von mir verwendeten Versuchsbedingungen gilt die von Bedford und Wyszecki (1958) gemessene Kurve (Abb. 3/4).

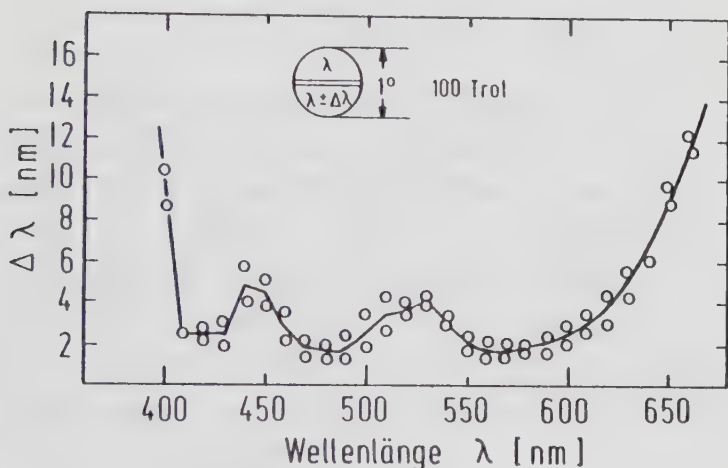


Abb. 3/4: Farbtonunterscheidung als Funktion der Wellenlänge (nach Bedford und Wyszecki, 1958).

Die Kurve zeigt, daß gleicher Farbtonabstand nicht gleicher Wellenlängenabstand bedeutet. Soll gleich gute Unterscheidbarkeit zwischen den Testreizen herrschen, so muß der physikalische Abstand der Reize verändert werden. Tabelle 2 gibt für jede Testfarbe den untersuchten Wellenlängenbereich wie auch den Wellenlängenabstand der Reize voneinander wieder:

Rotblau:	414 - 432 nm, 2 nm
Blau:	447 - 474 nm, 3 nm
Blaugrün:	480 - 498 nm, 2 nm
Grün:	491 - 518 nm, 3 nm
Grüngelb:	540 - 567 nm, 3 nm
Gelb:	570 - 588 nm, 2 nm
Gelbrot:	585 - 603 nm, 2 nm

Bei kleinerem $\Delta\lambda$ konnten die Vpn kein stabiles Kriterium einhalten, die Meßergebnisse streuten erheblich. Wie bei der Bestimmung des INW wurden 10 Farbreize in zufälliger Reihenfolge je 6 mal dargeboten. Abbildung 3/5 zeigt das Ergebnis eines Durchgangs.

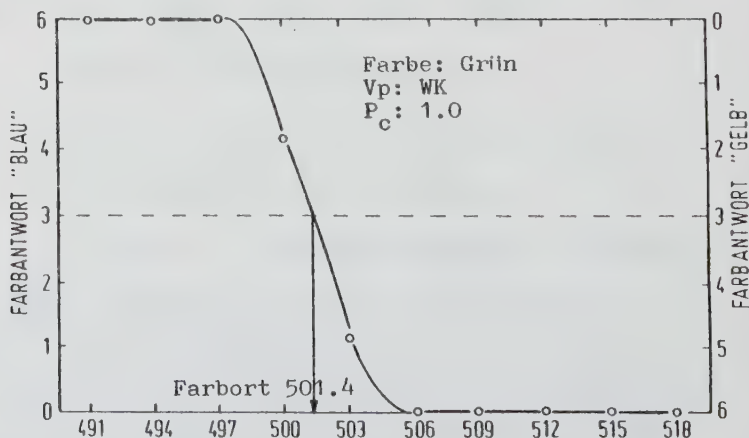


Abb. 3/5: Verteilung der Antworten als Funktion der Wellenlänge, Bestimmung des Farbortes "Grün".

Bei den Wellenlängen 491 bis 497 gab die Vp ausschließlich die Antwort "Blau", bei 506 nm und allen längerwelligen Farbtönen dagegen ausschließlich "Gelb". Die Wellenlängen 500 nm und 503 nm erhielten Mischantworten. Der Farbort wurde nun errechnet wie die Weißorte. In der Abbildung 3/5 ist dies auch zeichnerisch dargestellt.

Da sich die Urfarborte einer Vp von Tag zu Tag ändern können, wurden die reinen Farben immer am gleichen Tag wie die Mischexperimente mitgemessen. Die reinen Farben ($P_c = 1.0$) dienten als Bezugsreiz. Die Ergebnisse der reinen Farben sind Mittelwerte von mindestens 30 Einzelmessungen. Ich habe nur bis zur ersten Kommastelle gerechnet. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 3:

Tabelle 3: Durchschnittliche Farborte der 7 Spektralfarben:

Versuchsperson	WK	TLA	GH
Rotblau	420.2	418.2	425.1
Blau	460.3	458.5	460.0
Blaugrün	488.6	487.5	490.2
Grün	501.0	495.8	504.2
Grüngelb	550.6	550.5	565.8
Gelb	579.4	569.0	581.0
Gelbrot	594.3	592.5	590.2

Die großen Streuungen, vor allem im langwelligen Bereich des Spektrums, werden auch von anderen Autoren berichtet und sind innerhalb des farbnormalen Bereiches. Wasserman (1966) und Werker und Wooten (1978) haben unter ähnlichen Bedingungen folgende Farborte gefunden:

Blau:	<u>473.6</u>	<u>471.5</u>	469.0	468.0	468.0
Grün:	<u>505.3</u>	<u>496.3</u>	520.0	535.0	508.0
Gelb:	<u>576.7</u>	<u>571.5</u>	568.0	574.0	573.0

3.5. Konfigurationen

Bei den Versuchen zum Abney-Effekt wurden folgende colorimetrische Reinheiten untersucht:

$$P_c^* = 1.0, 0.85, 0.70, 0.60, 0.5.$$

Die dazu benützte Reizanordnung habe ich Konfiguration I genannt. Abbildung 3/6 zeigt eine Übersicht aller drei verwendeten Konfigurationen.

Für jede Farbe wurde die reine Spektralfarbe ($P_c = 1.0$) und die colorimetrischen Reinheiten P_c^* 0.85 bis 0.5 gemessen. Die Farbortverschiebung wurde folgendermaßen errechnet:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 \text{ (nm)} \quad (2)$$

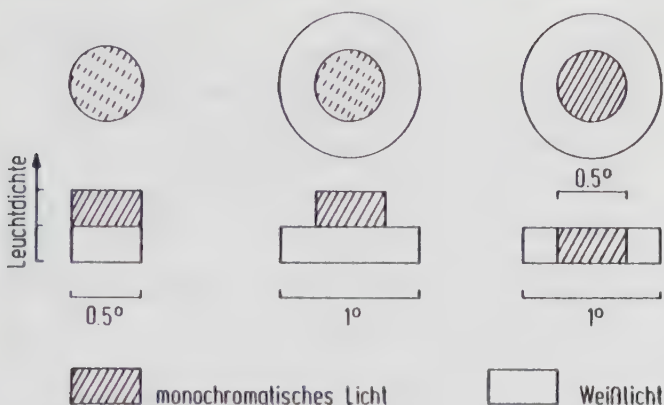
λ_0 = Farbort der reinen Farbe

λ' = Farbort der vermischten Farbe

Konfiguration I

Konfiguration II

Konfiguration III



Alle Leuchtdichteprofile für die Colorimetrische Reinheit 0.5

Abb. 3/6: Aufsicht und relative Leuchtdichteprofile der untersuchten Reizkonfigurationen.

Konfiguration I : Monochromatisches Testfeld mit zugemischtem Weißlicht (0.5°)

Konfiguration II : Auf weißem Hintergrund (1°) liegt das 0.5° große monochromatische Testfeld. Weiß als Umfeld und Mischlicht.

Konfiguration III : Monochromatisches Testfeld (0.5°) mit weißem Umfeld ($0.5^\circ - 1.0^\circ$)

Negative Werte für $\Delta\lambda$ zeigen an, daß die subjektive Veränderung eines Farbtones mit einer Verschiebung der Wellenlänge in den kürzerwelligen Bereich ausgeglichen werden mußte. Subjektiv erschien

der Farbton der Mischung λ_0 und Weiß in Richtung der langwelligeren Farben verschoben. Positive Werte kennzeichnen eine anschauliche Verschiebung zu kürzerwelligen Farbtönen, kompensiert werden mußte mit längerwelligem Licht. Das Vorzeichen gibt also die Lage des neuen Farbortes relativ zum Farbort der reinen Farbe an.

Beispiel: Ein Blau erschien allen Vpn bei zunehmendem Weißgehalt rötlicher. Um wieder ein reines Blau zu erzeugen, mußte die Wellenlänge des monochromatischen Anteils in Richtung Grün verschoben werden. Beide Meßwerte in Gleichung (2) eingesetzt, ergeben eine positive Farbortverschiebung (siehe auch Akita et al., 1964).

3.6. Streuung

Bei drei Vpn und zwei Versuchsdurchgängen pro Farbort ist die Anzahl zu klein, um eine Standardabweichung auszurechnen. Als Maß für die Streuung (S^*) habe ich den Bereich genommen, in welchem 70% aller Mischantworten liegen. Das bedeutet, daß alle Reize, auf die weniger als 6 gleiche Antworten entfielen, den Unsicherheitsbereich bilden. Dieser dient als Maß für die Streuung.

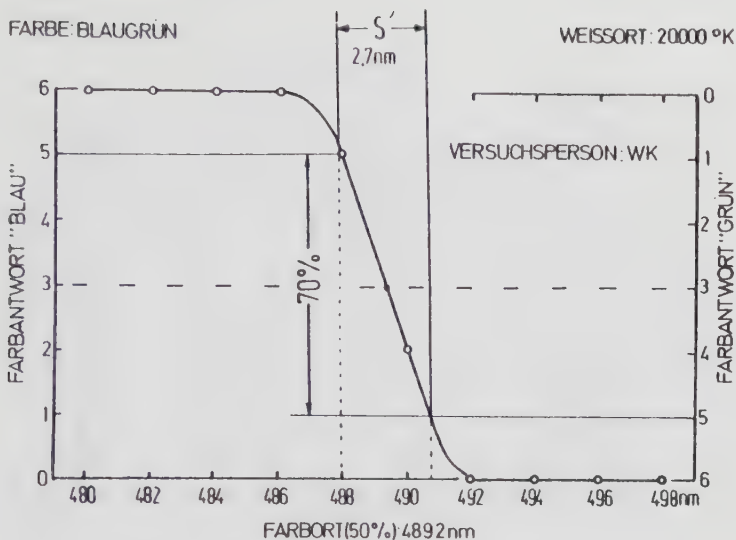


Abb. 3/7: Ermittlung der Streuung aus der graphischen Farbortfunktion für einen Versuchsdurchgang.

Da zum Teil sehr kleine Farbortverschiebungen gemessen wurden, war es wichtig, anhand der Streuung festzustellen, ob es sich um signifikante Verschiebungen handelte. Abbildung 3/8 zeigt die Streuung (S^*) für die Farben Rotblau und Gelb.

Gelb

Vp.: WK

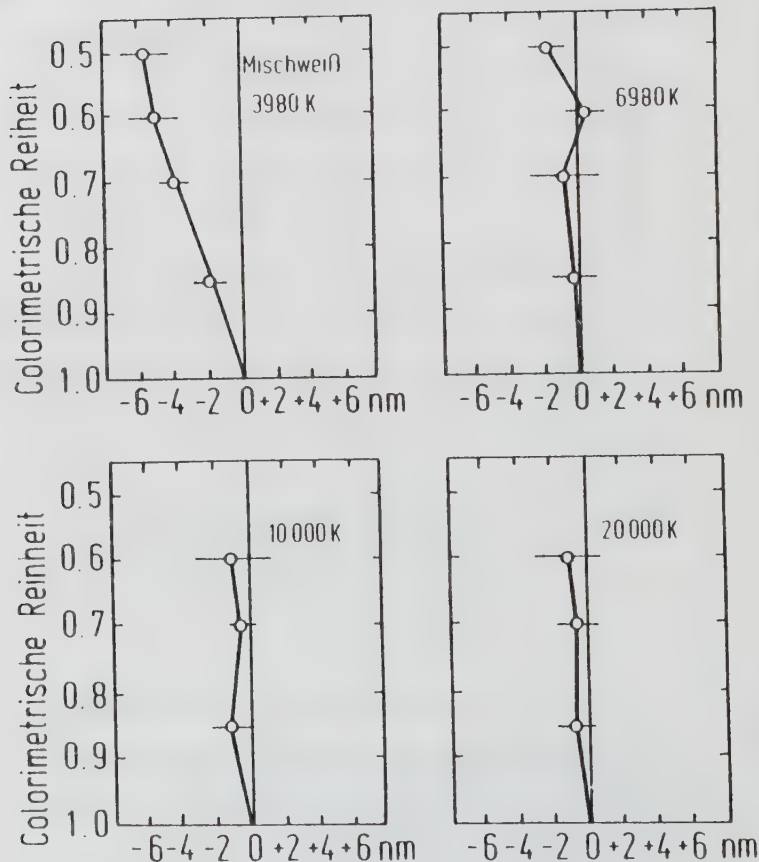


Abb. 3/8: Farbortverschiebung als Funktion der colorimetrischen Reinheit (Auftragung nach Abney, 1913). Die waagerechten Balken kennzeichnen die Streuung (S^*). Parameter der vier Einzelbilder ist die Farbtemperatur des Mischweißes.

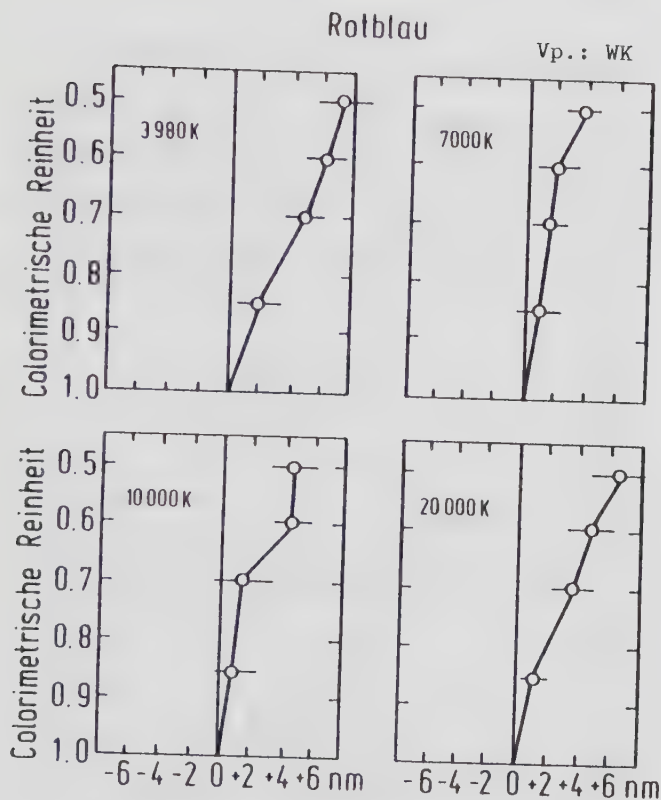


Abb. 3/8: Fortsetzung

Larimer et al. (1974) verwendeten bei ähnlichen Versuchen einen Unsicherheitsbereich von 80 %. Dieses würde in meinem Falle nichts ändern, da alle Mischantworten in den 70% Bereich fallen, also schon eine "falsche" Antwort den Meßpunkt in den Streubereich rückt.



4. ERGEBNISSE

4.1. Vergleich mit den Ergebnissen Abneys

Abney verwendete ein Weißlicht von 3.980 K, welches auch von mir für einen Versuch verwendet wurde. In Abbildung 4/2 werden die mit diesem Weiß gefundenen Ergebnisse miteinander verglichen.

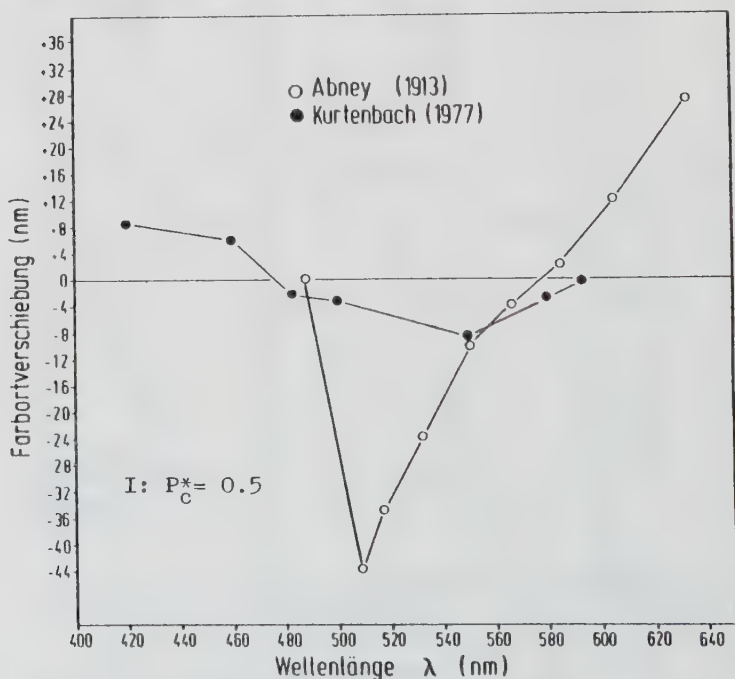


Abb. 4/1: Vergleich der aus 3 Vpn gemittelten Ergebnisse mit denen Abneys.

Farbortverschiebung von 7 (9) Farbtönen als Funktion der Wellenlänge, bei Zumischung von Abney-Weiß (3.980 K).

Colorimetrische Reinheit $P_c^* = 0.5$.

Der Vergleich zeigt eine Übereinstimmung in der Richtung der Farbortverschiebung, nicht aber im Betrag. Die von Abney mit Farbnamen versehenen Wellenlängen sind mit BG (Bluegreen), G (Green), GY (Greenyellow), Y (Yellow), YR (Yellowred) und R (Red) gekennzeichnet. Ich habe diese englischen Abkürzungen beibehalten, da sie Verwechslungen ausschließen (Grün-Gelb).

Die oben genannten Farbtöne haben bei Abney längerwellige Werte als die von mir gemessenen. Dies deutet auf helladaptierte Vpn hin (MacAdam, 1951). Ein Hinweis darauf fehlt in Abneys Arbeit. Auch fehlen genaue Angaben zur Versuchsanordnung, aus denen auf die Winkelgröße des Reizes geschlossen werden könnte. Ich weiß deshalb nicht, ob Abney ebenfalls mit rein fovealen Reizen gearbeitet hat.

Abney findet Farbortverschiebungen von mehr als 40 nm im Grünbereich. Im Rotbereich betragen sie bis zu 30 nm. So große Änderungen wurden von mir nicht gefunden. Anschaulich hieße eine solch große Verschiebung, daß ein gleichanteiliges Grüngelb, gemischt mit einem Weißlicht von 3.980 K völlig gelb aussähe. Der monochromatische Anteil, würde er um 40 nm in den kürzerwelligen Bereich verschoben, sähe nun für sich allein aus wie die Urfarbe Grün, in der Mischung mit Weiß aber wieder wie ein gleichanteiliges Gelbgrün.

Abney erklärte seine Befunde durch Farbaddition. Er nahm an, daß Weißlicht aus den Komponenten Rot und Grün bestehe. Falls auch Blau im Weiß enthalten sei, so sollte es nichts zur Farbwahrnehmung beitragen.

Abney mischte Weißlicht aus Grün, Rot und Blau und fand folgendes Mischungsverhältnis:

$$\begin{array}{ccc} \text{Red} & \text{Green} & \text{Blue} \\ 69.4 & + & 30.2 + 0.4 \end{array}$$

Er stellte nun für jeden Farbton die Farbmischgleichung auf, wobei er für Weiß die Rot-Grün-Mischung einsetzte. Mit Hilfe von Farbmischkurven, die er ebenfalls gemessen hatte, konnte er so den Farbort einer Mischfarbe (monochromatisches Licht plus Weiß) vorhersagen. Für die Wellenlängen zwischen 500 und 620 nm fand er eine sehr gute Übereinstimmung. Im kurzwelligen Teil des Spektrums dagegen stimmen die Vorhersagen nicht.

Mehr als 50 Jahre lang ist die Hypothese Abneys, wonach die Wahrnehmung Weiß hauptsächlich vom Verhältnis der Rot- und Grünanteile in einer Farbe abhängt, nicht beachtet worden. Erst in neuester Zeit mehrten sich die Befunde, daß es vielleicht keinen eigenen Weißkanal im Sehsystem des Menschen gibt, welcher Signale von allen Rezeptoren empfängt, sondern daß die Information aus dem Verhältnis von Zentrums- und Umfeldantwort farbantagonistischer Zellen in der Retina gewonnen wird. Hierfür gibt es indirekte psychophysische Hinweise (Thoma und Scheibner, 1978; Bauer, 1975) und neurophysiologische Daten (Zrenner und Gouras, 1978).

Trotz der guten Übereinstimmung, die Abney zwischen vorhergesagten und gemessenen Farbortverschiebungen findet, bleiben Zweifel an seinen Ergebnissen. Wie schon erwähnt, hat Abney kein angepaßtes Neutralweiß verwendet. Er hat seine Vergleichsreize in der Helligkeit abgeglichen, indem er die Spaltbreite im spektralen Strahlengang verändert hat. Dadurch änderte sich auch die Halbwertbreite seines Reizes. Dadurch kann sich auch der Farbton ändern, vor allem im blauen, grünen und grün-gelben Spektralbereich, da dort die Farbtonunterscheidungskurven starke Steigungsänderungen haben.

4.1.1. Weißverhüllung: Farbortverschiebung als Funktion der Colorimetrischen Reinheit (Abney-Effekt).

Der Abney-Effekt wurde mit Konfiguration I (S. 46) untersucht. In der nächsten Abbildung sind die Ergebnisse für eine V_p und 4 Sättigungsstufen gezeigt, Kurvenparameter ist die Farbtemperatur des Mischweißes. Die Einzelunterscheidung der Ergebnisse mit Weiß folgt später.

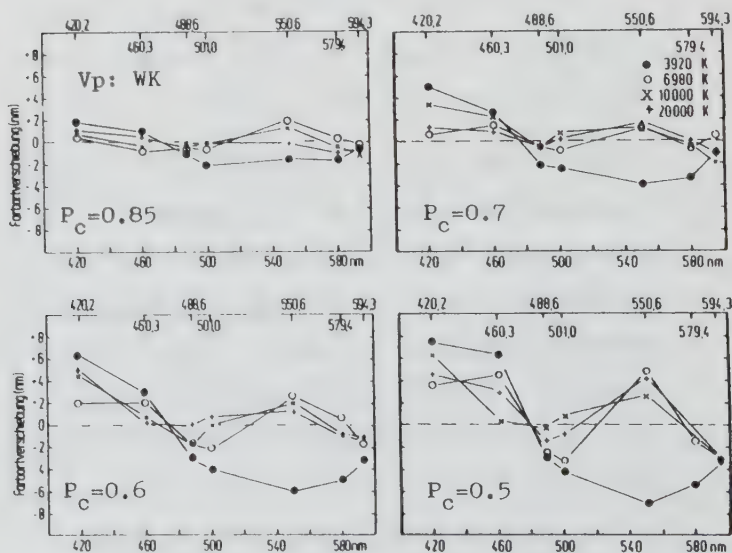


Abb. 4/2: Farbortverschiebung für 7 Farbtöne.

Die 4 Einzelbilder zeigen die Ergebnisse für die 4 untersuchten colorimetrischen Reinheiten.

Diese Kurven und die der anderen Versuchspersonen werden auf Seite 60 näher beschrieben. Anhand von Abb. 4/2 lassen sich schon einige in der Einleitung gestellte Fragen (Seite 18) beantworten:

1. Auch in dem von Abney nicht untersuchten kurzwelligen Teil des Spektrums (Purpur bis Blaugrün) treten Farbortverschiebungen auf.
2. Jede der untersuchten Weißarten verursacht Farbortverschiebungen, auch das individuelle Neutralweiß (INW).
3. Der Abney-Effekt verhält sich monoton, d.h. mit stetig zunehmendem Weißgehalt nimmt auch der Effekt zu.
4. Während die Farbtonänderungen, welche mit INW, 10.000 K-Weiß und 20.000 K-Weiß gefunden wurden einander ähnlich sind, weichen die mit Abney-Weiß ermittelten Verschiebungen im Gelbbereich stark ab.
5. Die Farben Blaugrün 488.6 nm und Gelb 579.4 nm zeigen nur geringe oder keine Farbortverschiebung.

Da sich der Effekt als stetig erwies, wurden bei der zweiten Vp (TLA) nur die colorimetrischen Reinheiten 1.0, 0.7 und 0.5 untersucht, bei einer dritten Vp die colorimetrischen Reinheiten 1.0 und 0.5.

4.1.2. Ergebnisse für 4 Weißarten und 3 Vpn.

In den folgenden Abbildungen werden die Farbortverschiebungen bei Weißverhüllung (Konfiguration I) gezeigt.

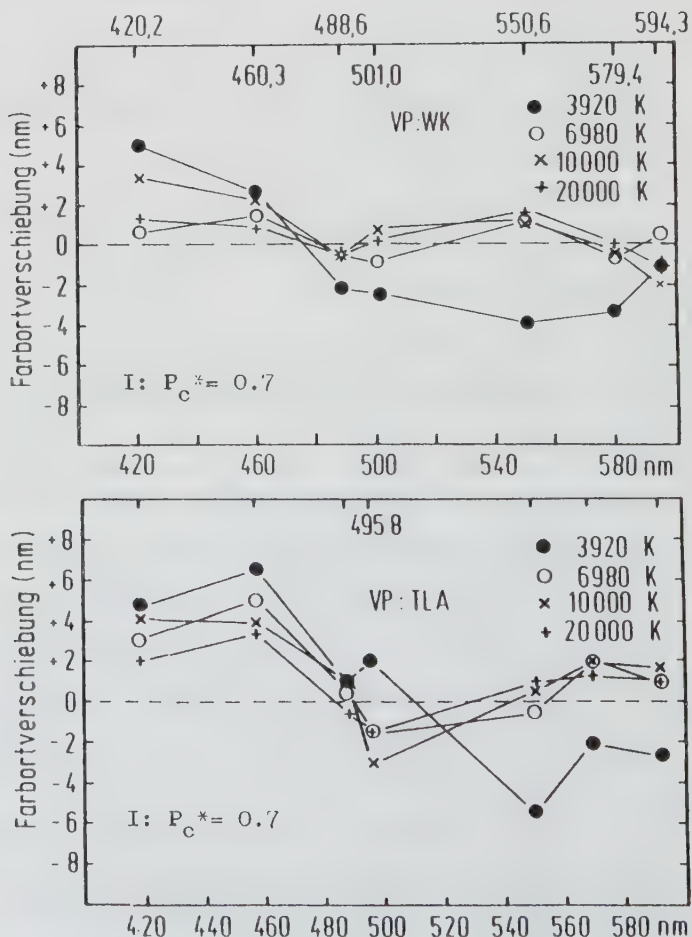


Abb. 4/3: Farbortverschiebung als Funktion der Wellenlänge für 7 Farbtöne. Obere Abszisse: Wellenlänge der reinen Farben. Kurvenparameter: Farbtemperatur des Weiß.

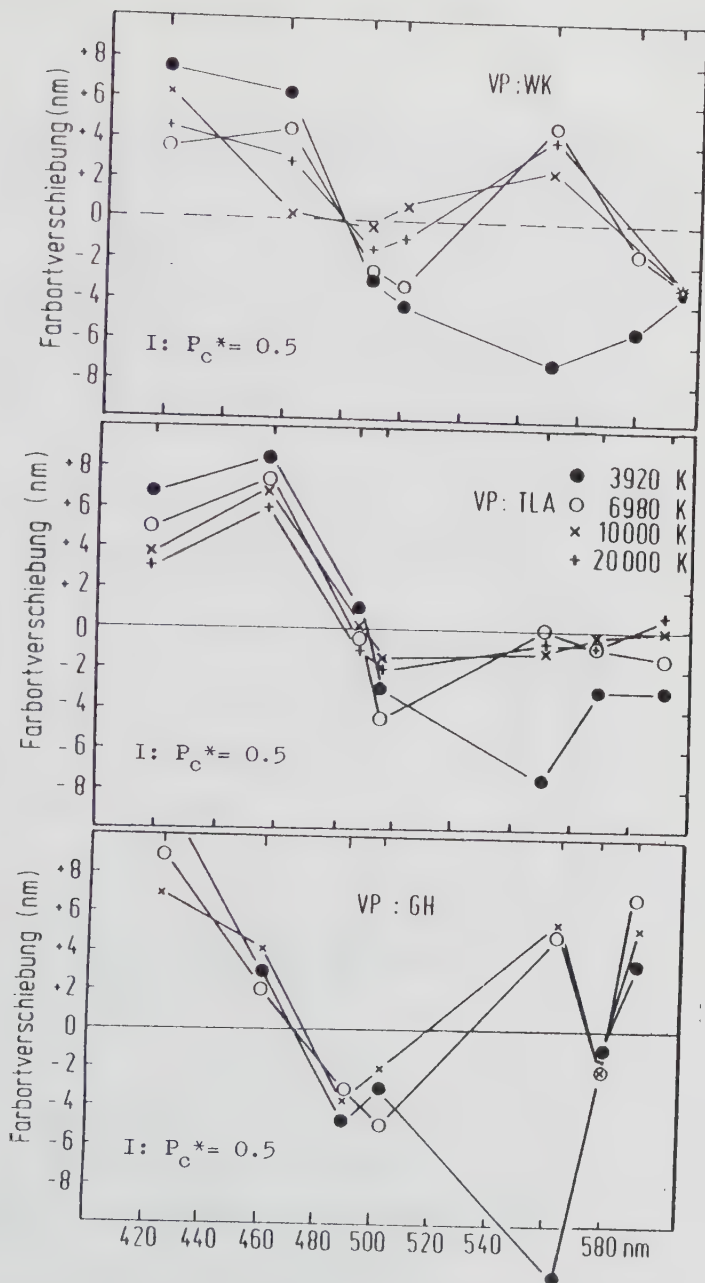


Abb. 4/4: siehe Abb. 4/3.

Die bisher gezeigten Ergebnisse steuern zwischen den Vpn beträchtlich, jedoch ist die Richtung der Farbortverschiebung für eine Farbe gleich. In der zusammenfassenden Diskussion wird auf die Unterschiede eingegangen. Für die Besprechung der qualitativen Befunde habe ich die Durchschnittskurven aller Vpn verwendet (Abb. 4/5).

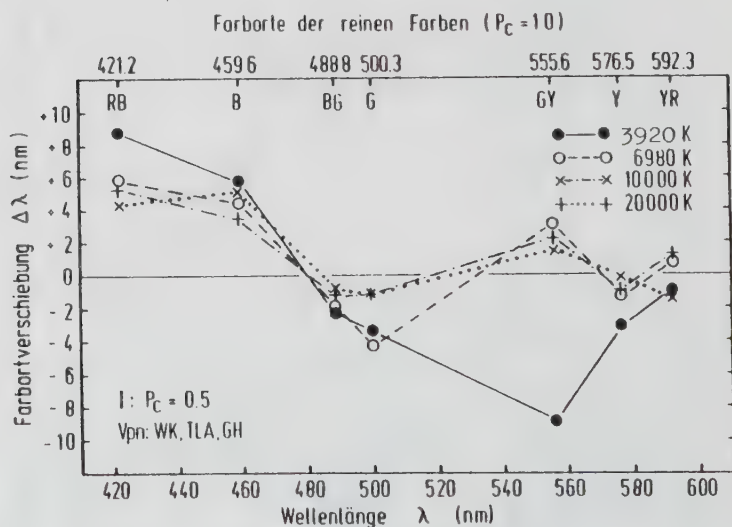


Abb. 4/5: Farbortverschiebung der 7 Testfarben als Funktion der Wellenlänge. Gemittelte Ergebnisse von drei Vpn bei der Colorimetrischen Reinheit 0.5. Monochromatischer Reiz: 14 Trol.

Die in Abb. 4/5 gezeigten Farbortverschiebungen lassen sich als Farbtonänderungen so beschreiben: Im kurzwelligen Teil des Spektrums bis 480 nm tritt bei Zumischung jedes Weißlichtes eine Rotempfindung auf, oder eine vorhandene Rotempfindung wird verstärkt. Um diesen Roteindruck wieder zu eliminieren, mußten alle Farborte in den längerwelligen Bereich verschoben werden. Alle 3 Vpn hatten ein Blaugrün, bei dem die Addition von Weiß keine Farbortverschiebung auslöste.

Im grünen Spektralbereich ließ das Abney-Weiß alle Farbtöne gelblicher erscheinen, die anderen Weißlichter nur die Urfarbe Grün. Gelbgrün, gemischt mit Neutralweiß oder einem bläulichen Weiß, erschien grünlicher.

Gelb und Gelbrot veränderten ihren Farbton nur wenig, die Effekte liegen für die Durchschnittskurve im Streuungsbereich. Nur das Abney-Weiß ließ Gelb deutlich rötlicher erscheinen.

4.1.3. Diskussion

Drei der vier verwendeten Weißlichter hatten einen bunten Farbton. Das Abney-Weiß sah gelblich aus, das 10.000 K-Weiß und das 20.000 K-Weiß sahen bläulich aus. Die Frage war, ob sich die gemessenen Farbortverschiebungen mit Farbaddition erklären lassen. Diese Möglichkeit soll an Hand einiger Beispiele geprüft werden:

Rotblau: Mischt man einen rotblauen Farbton mit einem gelben, so erwartet man, daß der blaue Anteil der Mischung durch das Gelb ganz oder zum Teil ausgebleicht wird. Der Farbton müßte rötlicher werden. Dies ist bei der Mischung von RB und Abney-Weiß tatsächlich der Fall. Aber auch die Mischung mit einem Neutralweiß oder mit bläulichen Weißlichtern erzeugte einen Purpurfarbton, die Rotempfindung nahm weniger zu als bei Abney-Weiß (Abb. 4/5). Da auch das jeweilige IN-Weiß eine ähnlich große Verschiebung hervorrief, kann Farbaddition den Effekt nicht allein erklären. Ebenhöf (1976) fand bei seinen Untersuchungen ebenfalls eine solche Farbtonänderung und schrieb: "In der Mischung Blau-Weiß trat bei allen Beobachtern eine merkliche Rotempfindung auf. Ob dies eine Folge davon ist, daß das Weißlicht nicht identisch mit dem Adaptationsweißlicht war, kann nicht ausgeschlossen werden."

Nach meinen Untersuchungen kann dies nun ausgeschlossen werden, da auch dunkeladaptierte Vpn mit einem individuellen Neutralweiß eine solche

Blau: Bei einer Mischung aus Blau und einem gelblichen Weiß würde man keine Farbortverschiebung erwarten, sondern lediglich eine stärkere Ausbleichung des Blau durch den gelben Farbton. Die Ausbleichung durch ein IN-Weiß müßte geringer sein, bläuliche Weißlichter sollten ein Blau am wenigsten entsättigen. Alle Weißlichter rufen jedoch eine starke Rotempfindung hervor. Auch hier zeigt das Abneyweiß den größten Effekt, möglicherweise weil es auch Rotanteile enthält.

Schon die beiden Beispiele Rotblau und Blau zeigen, daß der Abney-Effekt durch Farbaddition allein nicht erklärt werden kann. Es könnte noch ein zweiter Effekt beteiligt sein, den ich mit Ausbleichung bezeichne. Die spektralen Farbtöne ($P_c = 1.0$) sehen nicht gleich gesättigt aus. Mischt man ihnen gleiche Beträge Weißlicht bei, so bleichen sie unterschiedlich stark aus, d.h. ihre Sättigung verringert sich unterschiedlich schnell. Eine Farbe, die zwei Farbtöne enthält wie z.B. Grüngelb, wird ihren Farbort bei Mischung mit Weißlicht ändern, wenn beide Farbkomponenten unterschiedlich ausbleichen. Da Gelb schneller ausbleicht als Grün, wird ein Gelbgrün nach Addition von Neutralweiß grünlicher aussehen. Ich habe als Maß für die Ausbleichung der spektralen Farben die Kurven spektraler Sättigungsver-

teilung gewählt. Solche Kurven wurden mit sehr unterschiedlichen Methoden gewonnen und unterscheiden sich z.T. beträchtlich. Abbildung 4/6 zeigt einen Überblick, der von Hurvich und Jameson veröffentlicht wurde. Am adäquatesten erschienen mir die Kurven, bei denen zu einem konstanten Weißbetrag Spektrallichter zugemischt wurden. Als Maß für die Sättigung galt die Intensität, bei der gerade ein Farbeindruck wahrgenommen wurde (Purdy, 1931). Der umgekehrte Versuch, bei dem die gerade wahrnehmbare Menge Weißlicht, welche zu einem Spektrallicht gemischt wurde, als Sättigungsmaß dient, zeigt leider andere Ergebnisse. Die Sättigungsminima liegen aber übereinstimmend bei Gelb und Blaugrün.

Für solche Sättigungsmessungen müßte als Mischweiß ein IN-Weiß verwendet werden, was nicht in allen Fällen geschah. Darunter leiden auch die von Hemminger (1974) und Ebenhöf (1976) gemachten Untersuchungen, bei denen ein "Weißlicht" mit 3.500 K benutzt wurde, welches noch gelblicher als das Abney-Weiß mit 3.980 K war. Dies könnte die Ursache für den flachen Verlauf der Weißverhüllungskurve für Gelb sein, die Ebenhöf gemessen hat (Ebenhöf, 1976, Seite 58).

Der Effekt eines gelblichen Weiß, im Gegensatz zu anderen Weißlichtern, zeigte sich besonders bei

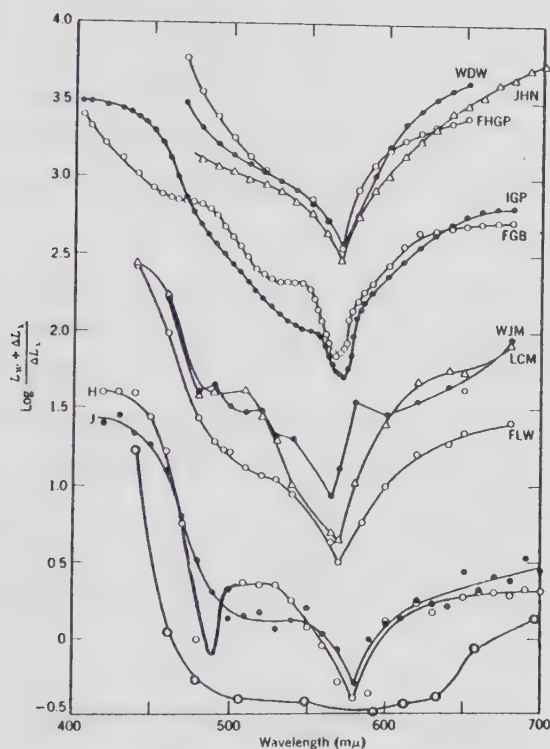


Abb. 4/6: Spektrale Sättigungskurven aus Hurvich und Jameson (1955).

Die unterste Kurve stammt von Purdy (1931) und wurde von mir eingefügt. Die Ordinaten-einheiten stimmen nicht mit denen der anderen Kurven überein, da Purdy ein anderes Sättigungsmaß verwendet hat. Die Werte weichen jedoch nur wenig ab.

den Farben Gelbgrün und Gelb. Mit dem Abney-Weiß konnte das Gelb nicht völlig zum Verschwinden gebracht werden, da das "Weiß" selbst gelblich aussah, mit einem 1N-Weiß gelang dies. Ergänzen sich Farbaddition und Ausbleichung, wie bei der Mischung eines bläulichen Weiß und Gelb, so erfolgte die völlige Ausbleichung schneller. So konnten zwei Vpn bei $P_c^* = 0.5$ und dem Mischweiß 20.000 K keine Farbbeurteilung der Urfarbe Gelb mehr vornehmen, da die wahrgenommene Sättigung zu gering war. Mit den anderen 3 Weißarten war dies noch möglich. Dies ist auch ein Beweis für das Zusammenwirken von Farbaddition (Blau + Gelb = Weiß) und Ausbleichung (Gelb hat die geringste spektrale Sättigung).

Kann der Abney-Effekt mit Ausbleichung und Farbaddition erklärt werden?

Rotblau: Nach den spektralen Sättigungskurven in Abb. 4/6 wird Rotblau weniger entsättigt als Blau, wenn Weißlicht addiert wird. Dadurch müßte der Roteindruck mit zunehmendem Weißgehalt ebenfalls zunehmen. Dies stimmt mit meinen Messungen überein.

Blau: Die Urfarbe Blau enthält keinen anderen Farbton. Bei einer Mischung mit 1N-Weiß würde man deshalb auch keine durch Ausbleichung bedingte Farbtonänderung vorhersagen. Im Experiment ergab sich jedoch eine starke Zunahme der Rotempfindung.

Blaugrün: In einer solchen Mischung müßte Blau durch Weiß weniger schnell ausgebleicht werden als Grün. Mit abnehmender colorimetrischer Reinheit sollte die Mischung mehr blau als grün erscheinen. Blaugrün ändert seinen Farbort jedoch nicht.

Untersucht man alle 7 Farbtöne nach ihrem theoretischen Verhalten bei Farbaddition und Ausbleichung, so kann nur ein Teil der von mir gefundenen Veränderungen damit erklärt werden. Auch wäre eine solche Erklärung phänomenologisch und müßte erst noch physiologisch interpretiert werden. Am besten kann man die unterschiedlichen Ergebnisse bei Grüngelb mit Farbaddition und Ausbleichung erklären.

Gelbgrün: Die Zwischenfarbe Gelbgrün wurde von den Vpn als subjektiv gleichwertige Mischung von Gelb und Grün eingestellt. Der Gelbanteil sollte bei einer Mischung mit IN-Weiß stärker ausbleichen als der Grünanteil. Die Mischfarbe müßte grünlicher aussehen. Dies ist im Experiment der Fall. Mischt man Grüngelb jedoch mit Abney-Weiß, so müßte der Gelbeindruck verstärkt werden. Als Ergebnis berichten die Vpn ein gelbliches Grün. In diesem Fall stimmen Vorhersage und Befund überein.

Die vorhergehenden Beispiele zeigen, daß eine Erklärung des Abney-Effektes mit Farbaddition und

Ausbleichung nicht möglich ist. Vor allem die auftretende Rotempfindung in einer blau-weißen Mischung schließt eine solche Erklärung aus. Bis heute gibt es noch keine sichere Hypothese. Möglich wäre eine summative Verschaltung des im kurz- und langwelligen Teil des Spektrums absorbierenden Zapfentyps (Hassenstein, 1968).

Der im langwelligen Teil des Spektrums absorbierende Zapfentyp hat zwischen 460 und 400 nm ein Nebenmaximum (Stiles, 1959). Dadurch reizen Wellenlängen unterhalb 460 nm sowohl den kurz- als auch den langwelligen Zapfentyp. Wenn die Signale des "Rotrezeptors" zur Rotempfindung beitragen, so könnte dieses Nebenmaximum die Ursache der Purpurempfindung sein. Durch die blaue Beleuchtung werden lang- und kurzwelliger Zapfentyp erregt, wobei der "Blaurezeptor" stärker erregt wird. In diesem Zustand wird unterhalb 460 nm noch kein Rot wahrgenommen, da das Signalverhältnis noch sehr ungleich ist. Bei der Zumischung von Weißlicht, das auch rote Anteile enthält, wird das Signalverhältnis zugunsten des "Rotrezeptors" verschoben, es entsteht eine Purpurwahrnehmung. Ebenhöf (1976) wies mit einer Modellrechnung nach, daß diese Daten

allein nicht ausreichen, da die mittels einer Rechnung simulierten Farbvalenzkurven nur angenähert mit den gemessenen übereinstimmen (Ebenhöf, Abb. 3.9).

Dieser Effekt könnte noch durch einen Hemmmechanismus unterstützt werden, den Creutzfeldt (1978) neurophysiologisch nachgewiesen hat. Wird aus farboponenten Zellen im Geniculatum des Rhesusaffen abgeleitet, so zeigt sich, daß nicht alle Neurone von Weißlicht erregt werden. Die blau/gelb opponenten Zellen werden von Weißlicht gehemmt, von blauem Licht dagegen erregt. Rot/grün opponente Zellen werden sowohl von Weißlicht als auch rotem Licht erregt. Sollten die farboponenten Zellen die physiologische Basis der Farbkanäle sein, so müßte durch einen weißblauen Reiz der Blauedruck gehemmt, der Roteindruck jedoch verstärkt werden. Dies würde das Auftreten der Rotempfindung im blauen Spektralbereich für alle Weißarten erklären.

Ein dem Abney-Effekt verwandtes Phänomen ist der Bezold-Brücke Effekt. Die dabei auftretenden Farbortverschiebungen werden heute durch Nichtlinearität der retinalen Signalverrechnung erklärt (Walraven, 1973; Bauer, 1975). In einer Modellrechnung konnte Bauer eine gute Übereinstimmung mit den von Purdy (1931) und Wild und Bouman (1968) gemessenen Farb-

In meinem Versuch war die Leuchtdichte der monochromatischen Reize 12 - 16 Trol. Bei der kleinsten colorimetrischen Reinheit ($P_c^* = 0.5$) erhöhte sich die Leuchtdichte auf 26 - 30 Trol. Dies ist ein Helligkeitsbereich, in dem eine intensitätsbedingte Farbortverschiebung unwahrscheinlich ist, da beide Leuchtdichten im unteren photopischen Bereich liegen.

4.1.4. Zusammenfassung

1. Verändert man die Sättigung eines monochromatischen Reizes, so ändert sich auch der Farbton des Reizes (Abney-Effekt).
2. Betrag und Richtung der Farbtonänderung hängen von der Art und Intensität des Weißlichtes ab.
3. Mit stetiger Zunahme des Weißgehaltes einer Farbmischung (und damit abnehmender Sättigung) nimmt auch die Farbtonänderung stetig zu.
4. Im kurzwelligen Bereich verursacht die Zumischung von Weiß eine Rotempfindung, bzw. eine Zunahme der Rotempfindung.
5. Im grüngelben Spektralbereich verstärkt Wolfram-Licht (ca. 3.900 K) den Gelbeindruck, ein Neutralweiß und bläuliche Weißlichter die Grünempfindung.
6. Wolfram-Licht verursacht größere Farbtonänderungen als Weißlichter höherer Farbtemperatur.

7. Die Farben Blaugrün (485 - 490 nm) und Gelb (580 nm) zeigen bei keiner V_p einen Abney-Effekt.
8. Der Abney-Effekt kann durch Farbaddition und Ausbleichung nicht erklärt werden.

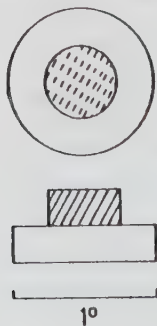


4.2. Farbortverschiebung als Funktion der Hintergrunds- und Umfeldleuchtdichte.

Konfigurationen II und III.

Im ersten Teil der Arbeit wurden alle Testreize auf schwarzem Hintergrund dargeboten. Im zweiten Teil meiner Arbeit werden die Farbortverschiebungen monochromatischer Reize bei weißem Hintergrund und mit einem weißen Umfeld gemessen. Um Verwechslungen zwischen den Begriffen Hintergrund und Umfeld auszu-schließen, werden beide in Abb. 4/7 noch einmal definiert.

Konfiguration II



Konfiguration III

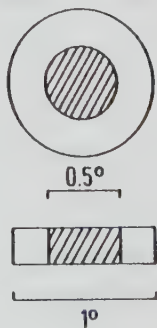


Abb. 4/7;

Hintergrund (1°)

Umfeld ($0.5^\circ - 1^\circ$)

Wird ein 0.5° großer Reiz auf einem 1° großen Hintergrund projiziert (Konfiguration II), so wird die colorimetrische Reinheit des spektralen Reizes von der Intensität des weißen Hintergrundes bestimmt, gleichzeitig ist der Reiz von einem 0.25° breiten Ring umgeben. Bei Änderung der Hintergrunds-leuchtdichte werden neben der Sättigung auch die Helligkeit und der Farbton des Farbreizes verändert.

Wird das Testfeld nur von einem weißen Ring umgeben, so ändern sich mit zunehmender Umfeldleuchtdichte diese drei Qualitäten ebenfalls. Daneben verändert sich noch die Latenzzeit eines fovealen Reizes (Matteson, 1970, 1971), Nachbilder werden durch Umfeldler schneller zum Verschwinden gebracht (McDougall, 1904), und das zeitliche Auflösungsvermögen wird verbessert (Ripps et al., 1961; Harvey, 1970). Die anschauliche Veränderung eines Farbreizes durch ein weißes Umfeld heißt Schwarzverhüllung (Pohl, 1963).

4.2.1. Ergebnisse mit Konfiguration II.

Monochromatischer Testreiz (0.5^0) auf weißem Hintergrund (1^0).

Die Versuche wurden mit 2 Vpn durchgeführt:

Vp WK : $P_c^* = 1.0, 0.7$ und 0.5

Weißlichter: 3.920 K, 6.980 K, 10.000 K und 20.000 K

Vp GH : $P_c^* 1.0$ und 0.5

Weißlichter: 3.920 K, 6.800 K und 20.000 K.

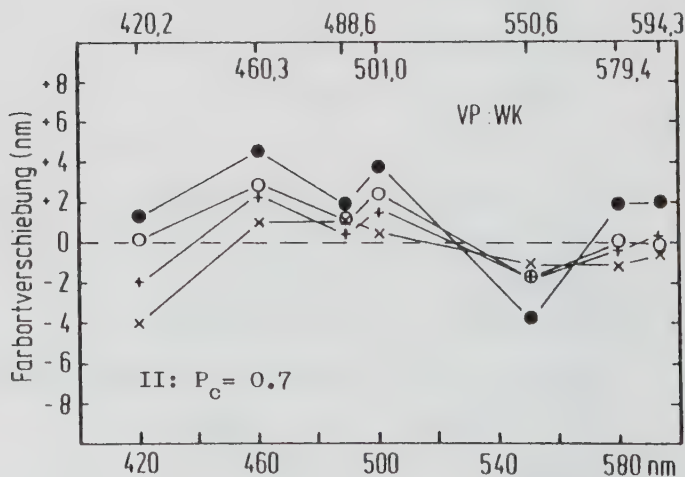


Abb. 4/8: Farbortverschiebung als Funktion der Hintergrundleuchtdichte.

Die Leuchtdichte des monochromatischen Reizes betrug 14 Trol bei 580 nm. Das Weiß wurde mit diesem Reiz in der Helligkeit abgeglichen. Zur Herstellung der colorimetrischen Reinheit 0.7 betrug das Leuchtdichteverhältnis:

$$L_w^* = 0.3 L_s^*$$

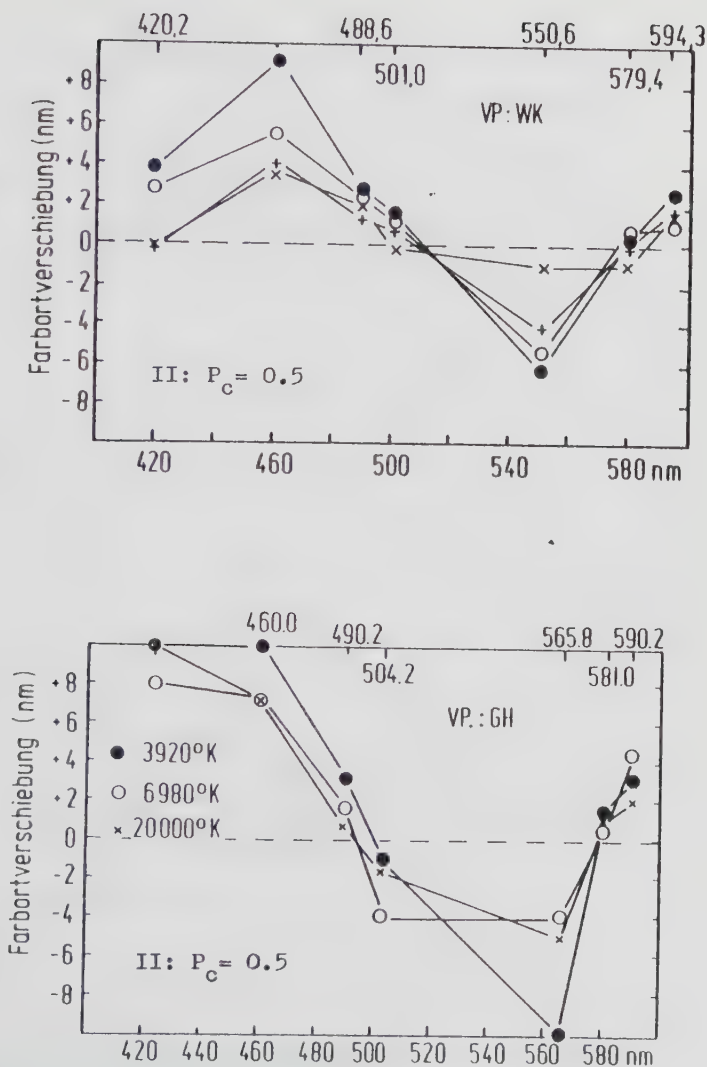


Abb. 4/8:

$$L_{\text{Infeld}} = L^*_s + L^*_w \quad (L^*_s = L^*_w)$$

$$L_{\text{Umfeld}} = L^*_w$$

$$L^*_I / L^*_U = 2$$

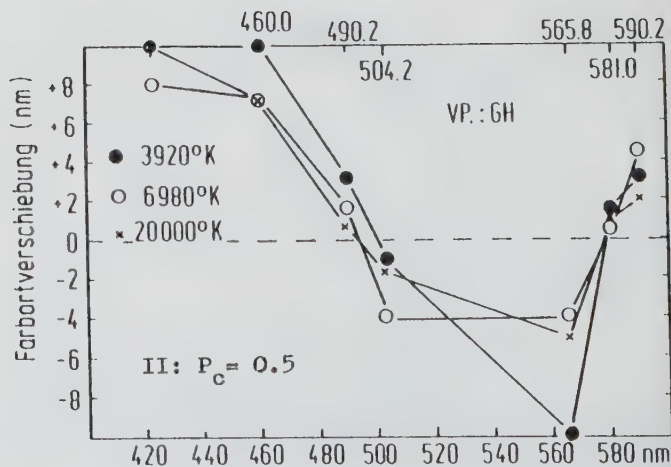
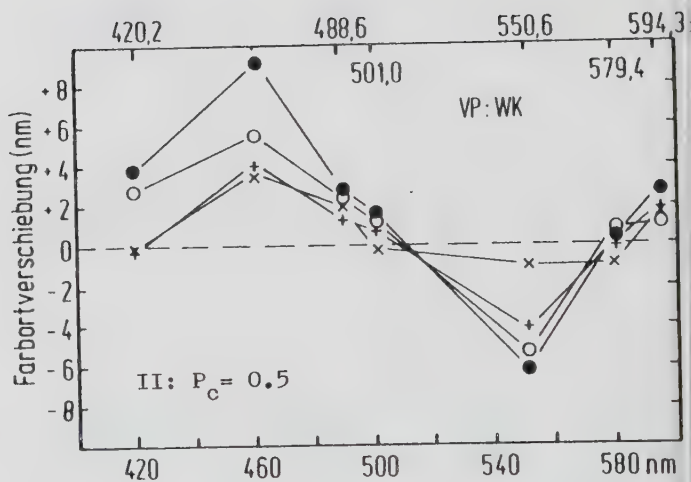


Abb. 4/8:

$$L_{\text{Infeld}} = L^*_s + L^*_w \quad (L^*_s = L^*_w)$$

$$L_{\text{Umfeld}} = L^*_w$$

$$L^*_I / L^*_U = 2$$

Die Ergebnisse von Versuch 2 zeigen wie der erste Versuch große Unterschiede zwischen den V_{pn} . Zur Besprechung der qualitativen Farbtonänderungen mit weißem Hintergrund wurden die Ergebnisse gemittelt (Abb. 4/9). Auf die individuellen Unterschiede wird in der Schlußdiskussion im Kapitel 5 eingegangen.

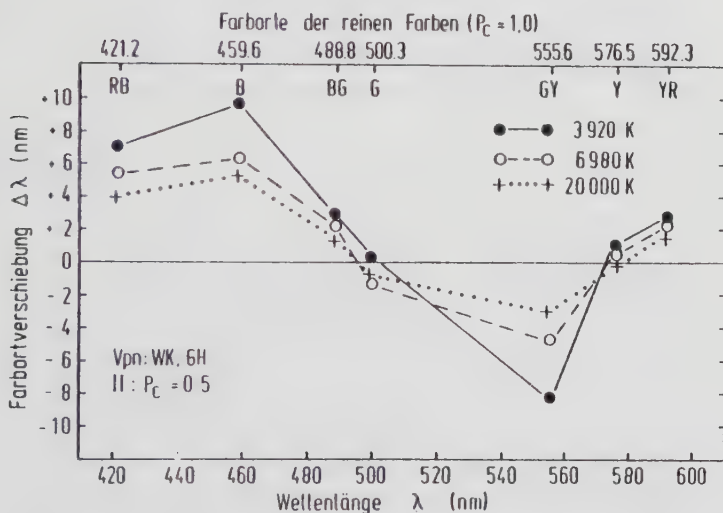


Abb. 4/9: Legende wie Abb. 4/8.

Werden monochromatische Reize auf einem weißen Hintergrund dargeboten, so verändern sie ihre Helligkeit, Sättigung und den Farbton. Die Farben Rotblau und Blau erscheinen rötlicher. Die Farbe Blaugrün erscheint grünlicher. Die Urfarben Grün und Gelb verändern ihren Farbort nicht. Bei den Zwischenfarben Gelbgrün und Gelbrot nimmt der Gelbeindruck zu.

Alle 3 Weißarten verhalten sich in der Richtung der Farbortverschiebung gleich, die Beträge sind unterschiedlich.

Das Abney-Weiß verursacht die größten Veränderungen des Farbtones. Eine vergleichende Diskussion mit den Ergebnissen der Weißverhüllung folgt im Kapitel 5.



4.2.2. Ergebnisse mit Konfiguration III, Schwarzverhüllung.

Monochromatisches Testfeld (0.5^0) mit weißem Umfeld ($0.5^0 - 1.0^0$).

Die Versuche wurden mit 2 Vpn durchgeführt.

Vp WK : $P_c^* = 1.0, 0.7$ und 0.5 .

Weißlichter 3.920 K, 6.980 K, 10.000 K
und 20.000 K.

VP GH : $P_c^* = 1.0$ und 0.5 .

Weißlichter 3.920 K, 6.800 K und 20.000 K.

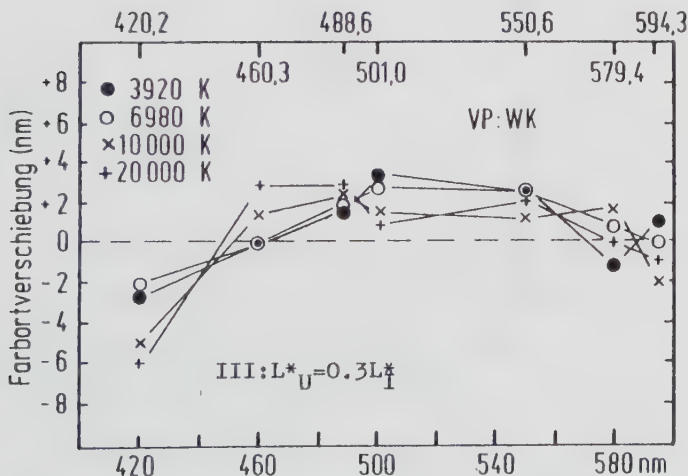


Abb. 4/10: Farbortverschiebung für 7 Farbtöne als Funktion der Wellenlänge bei weißem Umfeld (Schwarzverhüllung).

$$L^*_I = 14 \text{ Trol}$$

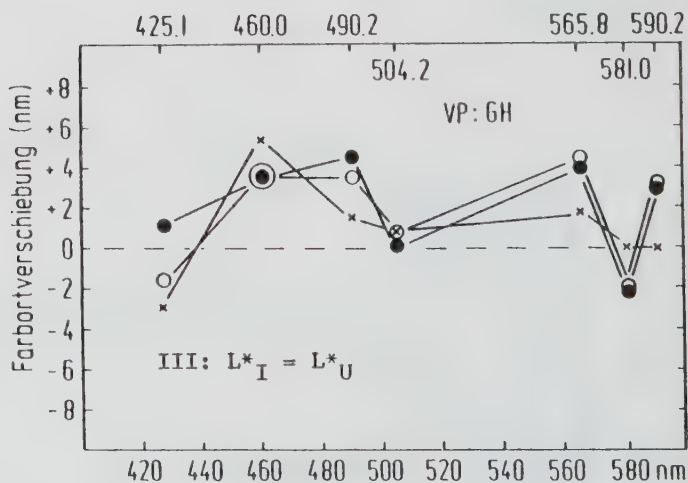
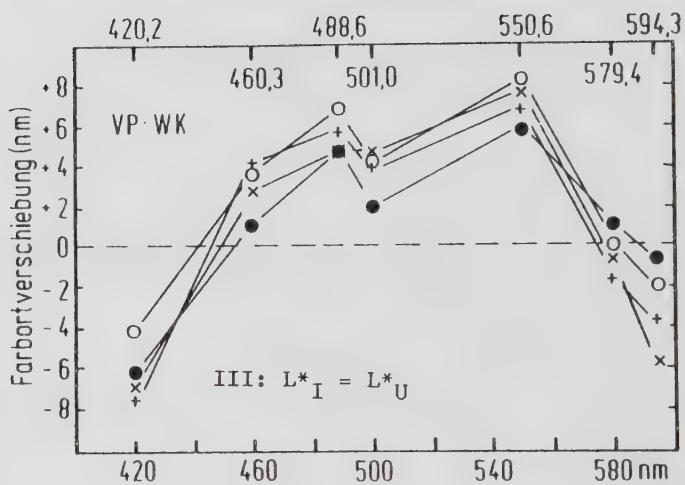


Abb. 4/11: Legende wie in Abb. 4/10

Zur Interpretation der Ergebnisse wurden die Ergebnisse der beiden Vpn wieder gemittelt.

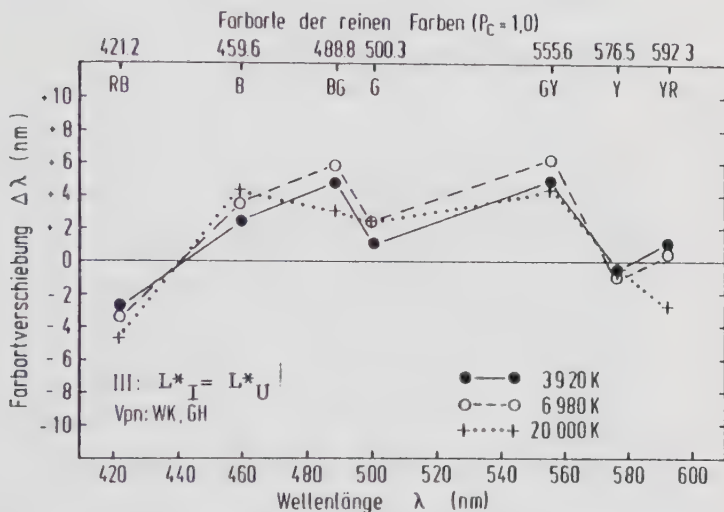


Abb. 4/12: Legende wie in Abb. 4/10.

Unter den Bedingungen der Schwarzverhüllung verursachen alle 3 Weißarten sehr ähnliche Farb- wandlungen. Die Stärke der Farb- wandlung (gemessen als Farbortverschiebung) nimmt mit steigender Umfeldintensität zu.

Rotblaue Farbtöne erscheinen bläulicher, die Urfarbe Blau rötlicher. Blaugrün erscheint deutlich blauer, während Grün seinen Farbort

sehr wenig ändert, ebenso wie Gelb. Bei Gelbgrün wird durch ein weißes Umfeld der Grüneindruck verstärkt. Der Farbort von Gelbrot verändert sich nur bei Zumischung des bläulichen Weiß, und zwar in Richtung Rot.



4.2.3. Diskussion

Durch die von mir benützten Hering-Kriterien zur Beurteilung der Ur- und Zwischenfarben (siehe S. 41) sagen die gemessenen Farbtorte nur indirekt etwas über die wahrgenommenen Farbtöne aus. Die Farbe "Gelb" z.B. bewertete die Vp nur nach "grünlich" oder "rötlich". In Gegenwart des weißen Umfeldes erschien das Gelb "bräunlich". Die Vp beurteilte diese neue Farbqualität wieder danach, ob sie mehr "rötlich" oder "grünlich" aussah. Nach dieser Ausschlußmethode entsprach der gemessene Farbtort der Farbe Braun, der weder "rötlich" noch "grünlich" zuzuordnen war. Die Ergebnisse zeigen, daß trotz der Farbänderung von Gelb zu Braun sich der Farbtort nicht veränderte (Abb. 4/12).

Da nur das jeweilige IN-Weiß ein reines Weiß war, erschienen die anderen 3 Weißarten als ungesättigte, gelbliche oder bläuliche Umfeldler. Solche Umfeldler können einen simultanen Farbkontrast

auslösen (Valberg, 1975). Aber auch das farbige Infeld induziert einen simultanen Farbkontrast im weißen Umfeld. In meinem Versuch war diese Farbinduktion so stark, daß selbst das sonst gelbliche Abney-Weiß bläulich erschien, wenn im Testfeld die Farben Gelb oder Gelbgrün untersucht wurden. Bei einem blauen Testfeld sah das weiße Umfeld immer gelblich aus, selbst wenn das Weiß mit 20.000 K als Umfeld diente.

Ungesättigte Farben können einen Farbkontrast hervorrufen, bei dem die induzierte Farbe die gleiche Buntheit hat wie die induzierende Farbe (Valberg, 1975). Bei den Versuchen mit Konfiguration II berichteten die Vpn, daß die Sättigung der im Umfeld induzierten Farbe in einigen Fällen die des Testfeldes erreichte.

Dieser starke Farbeindruck im Umfeld könnte seinerseits wieder einen simultanen Farbkontrast auf das Infeld ausüben und so die Farbwandlung hervorrufen. Das setzt voraus, daß induzierte Farben wiederum Farben induzieren können. Meines Wissens ist dies experimentell noch nicht untersucht und würde auch der heutigen Vorstellung der lateralen Hemmung widersprechen. Wenn ein simultaner Farbkontrast vom Umfeld ausgeht, dann vom Farbton des Weißlichtes selbst, obwohl dieser nicht mehr wahrgenommen wird. Wahrgenommen wird die vom Infeld induzierte Kontrastfarbe.

Wie Abbildung 4/12 zeigt, weichen die Ergebnisse für die drei Weißarten nicht signifikant voneinander ab. Die Ursache der Farbortverschiebung kann somit nicht der unterschiedliche Farbton der Weißlichter (bläulich, neutral, gelblich) und die dadurch induzierte Farbe im Infeld sein.

Selbst wenn man annimmt, daß von der im Umfeld wahrgenommenen Induktionsfarbe ein simultaner Farbkontrast ausgeht, könnten die Ergebnisse nicht erklärt werden. Das Urblau als Testfarbe würde ein Grüngelb im Umfeld induzieren, dieses Grüngelb wiederum Blau im Infeld. Die Addition einer Kontrastfarbe zu einem Feld gleicher Farbart verursacht aber eine Sättigungs- und Helligkeitsänderung, aber keine Farbtonänderung, wie Oehler und Spillmann (1978) gezeigt haben.

Ich schließe daraus, daß die von mir gefundenen Farbortverschiebungen ihre Ursache in einer Wechselwirkung der Signale von Test- und Umfeld haben, die nicht dem simultanen Farbkontrast entspricht.

4.3. Neurophysiologische Befunde zur Schwarzverhüllung (Konfiguration III).

4.3.1. Einleitung

Simultaner Helligkeitskontrast oder simultaner Farbkontrast treten auf, wo immer zwei Flächen unterschiedlicher Leuchtdichte oder Farbe aneinander grenzen. Werden z.B. in Konfiguration III Infeld und Umfeld zuerst gleich beleuchtet, dann die Beleuchtung des Infeldes langsam verändert, so ändern sich Helligkeit und/oder Farbe des Umfeldes mit. Die Änderung ist so, daß der wahrgenommene Unterschied größer ist als der physikalisch meßbare (Kontrastverstärkung). Auf diese Weise sorgt der physiologische Kontrastmechanismus dafür, daß wir Helligkeits- oder Farbunterschiede wahrnehmen, die wir ohne diesen Mechanismus nicht unterscheiden könnten.

Kontrastverstärkung tritt sowohl an Kontrastgrenzen (Mach-Bänder), als auch zwischen Flächen auf (simultaner Helligkeitskontrast, Schwarzverhüllung). Békésy (1968) hat zur Erklärung beider Phänomene zwei Arten lateraler Hemmung vorgeschlagen, Mach-Band-Hemmung und Hering'sche Hemmung. Beide sollten sich in ihrer Stärke und Ausdehnung unterscheiden. Über das neurophysiologische Korrelat dieser Empfindungsphänomene herrscht noch keine Einheit. Es ist sowohl die generelle hemmende Ver-

schaltung aller Zapfen untereinander denkbar, als auch die hemmende Verschaltung definierter Retinaflächen, sogenannter rezeptiver Felder.

Hartline (1940) postulierte als erster das Konzept, nach welchem die Retina der Wirbeltiere aus sich überlagernden Rezeptiven Feldern (RF) bestehen soll. Ein RF ist die Fläche auf der Retina, welche bei Lichteinwirkung die Antwortrate einer Ganglienzelle beeinflusst.

Bis heute wurde nicht nur bei vielen Säugtieren die Existenz der RF nachgewiesen, es wurden unterschiedliche Typen entdeckt, denen bestimmte physiologische Funktionen zugesprochen werden. Prinzipiell gibt es Neurone, welche auf Lichteinwirkung mit einer Erhöhung der Antwortrate reagieren, on-centre Zellen, und off-centre Zellen, welche ihre Antwortrate senken. Beide Typen kommen als opponente Zellen oder als nicht-opponente Zellen vor.

Die opponenten Zellen sind in ein Zentrum (RFZ) und ein Umfeld (RFU) gegliedert. RFZ und RFU sind konzentrisch angeordnet. Wird das RFZ durch Licht erregt, so wird es durch Licht im RFU gehemmt und umgekehrt. Die nicht-opponenten Zellen haben kein hemmendes Umfeld.

Daneben gibt es farbspezifische Zellen, die ebenfalls opponent oder nicht-opponent organisiert

sein können. Eine red on-centre/green off-surround Zelle z.B. wird durch Rotlicht im RFZ und grünes Licht im RFU erregt, grünes Licht im RFZ und rotes Licht im RFU hemmen die Antworten. DeValois et al. (1966), Mead (1967) und Marrocco (1972) fanden vier Typen räumlich farbantagonistischer Zellen im LGN des Affen: R+/G-, G+/R-, B+/Y- und Y+/B-. Hartline (1949) entdeckte ebenfalls die hemmende Wechselwirkung benachbarter Retinaorte und nannte diese laterale Hemmung. Diese wird als Ursache der Mach-Bänder-Wahrnehmung angesehen (Ratliff, 1965). Baumgartner (1962/1965) dagegen erklärt sie mit der erregenden und hemmenden Wechselwirkung innerhalb der RF zweier getrennter Systeme (on- und off-System). Er nimmt an, daß die Empfindung Weiß auf der Erhöhung der Antwortrate in den on-centre Zellen beruht, die Wahrnehmung der achromatischen Farbe schwarz auf der Erregung von off-centre Zellen. Neurophysiologisch konnte er bei der Katze zeigen, daß off-centre Zellen auf der dunklen Seite eines schwarz-weißen Musters erregt werden, auf der hellen Seite die on-centre Zellen.

Die Größe der psychophysisch gemessenen RF des Menschen stimmt gut mit denen des Rhesusaffen überein, welche mit neurophysiologischen Methoden gemessen wurden (Wiesel und Hubel, 1966; Ransom-Hogg und Spillmann, 1980).

Die Erklärung Ratliffs für die Entstehung der achromatischen Mach-Bänder könnte auch für farbige Mach-Bänder verwendet werden, wobei räumlich opponente Farbzellen zur Erklärung verwendet werden müßten. Das gleiche gilt für Flächenkontraste. Das einheitliche Vorkommen des simultanen Farbkontrastes und der Schwarzverhüllung über Felder von 20° erfordert einen Ausbreitungsmechanismus über die Mach-Bänder hinaus. Das einheitliche Erscheinungsbild der Flächenkontraste, welche von einer Kontrastgrenze aus induziert werden, veranlaßte Walls (1954) einen Einfüllvorgang (filling-in process) zu postulieren, der die Ursache der wahrgenommenen Einheitlichkeit sein soll. Neurophysiologische Befunde für einen solchen Mechanismus gibt es noch nicht. Ich will aus den bisherigen Daten versuchen, zwei Möglichkeiten zu formulieren.

Fällt Licht auf die Rezeptoren der Retina, so werden diese hyperpolarisiert und geben Signale an die Bipolar- und Horizontalzellen weiter. Eine Horizontalzelle verbindet die Zapfen eines bestimmten Gebietes miteinander ($20 - 25 \mu\text{m}$). Von den Bipolarzellen werden die Signale zu den Amakrin- und Ganglienzellen weitergeleitet (siehe Abb. 4/13). Dieses Wissen stammt aus den Untersuchungen mehrerer Wirbeltierarten (Barlow, 1953, Frosch; Baumgartner und Hakas, 1962, Katze; Wiesel und Hubel, 1966,

Rhesusaffe; Boycott und Dowling, 1969, Rhesus-
affe; Wässle, 1977, Katze; Byzov, 1977, Hecht).

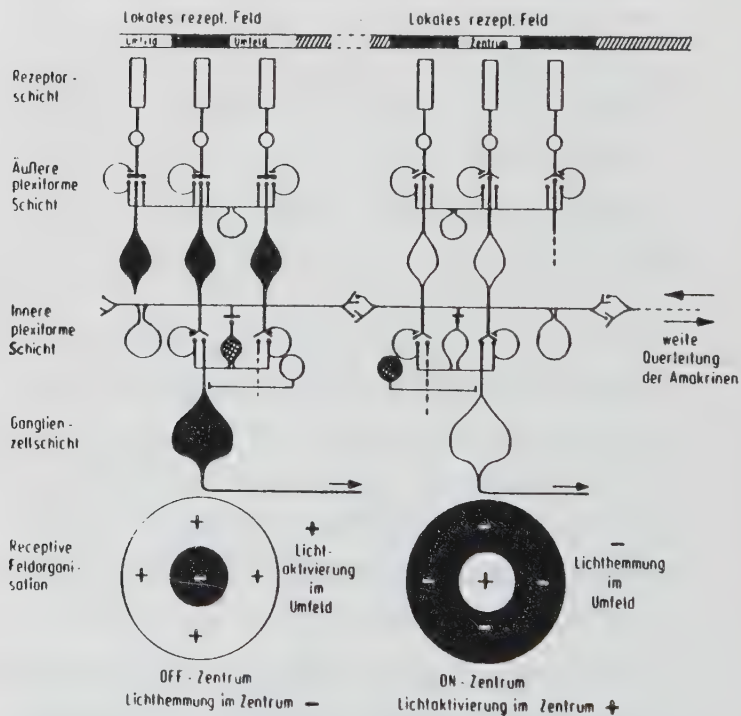


Abb. 4/13: Funktionsschema der Netzhaut am Beispiel einer off-Zentrum- und einer on-Zentrum Zelle.

—|— erregende Synapsen
—●— hemmende Synapsen
(nach Jung, 1978).

Die Signale der Zapfen hemmen sich wechselseitig, wobei angenommen wird, daß diese laterale Hemmung über die Horizontalzellen läuft (Werblin und Dowling, 1969). Die Hemmung könnte an den Zapfen selbst oder an den Bipolarzellen ansetzen. Die Amakrinzellen erhalten Signale von mehreren Bipolarzellen, und sie können hemmend auf die Antwortrate der Ganglienzellen wirken (Werblin, 1972; Werblin und Copenhagen, 1974).

Hemmung kann in der Retina von Katzen und Primaten über Entfernungen gemessen werden, die die Ausdehnung der Horizontal- oder Amakrinzellen übersteigt (McIlwain, 1964). Hemmungsleitung ist also nicht auf RF beschränkt. In psychophysischen Versuchen konnte beim Menschen Hemmung über Distanzen von 8^0 Gesichtswinkel gemessen werden (Matin et al., 1972; Neumeyer und Spillmann, 1977; Neumeyer et al., 1979).

Wenn der Grenzkontrast mit retinaler lateraler Hemmung erklärt werden kann (Baumgartner und Ilakas, 1962; Grüsser et al., 1976), so müßte die Antwortrate einer retinalen Ganglienzelle direkt vom Leuchtdichteunterschied an einer Kontrastgrenze abhängen. Dies zeigte Baumgartner bei der Katze. Der Flächenkontrast könnte eine ähnliche Ursache haben, wobei

1. ein Einfüllmechanismus angenommen werden muß, der alle Ganglienzellen im Infeld erfaßt, oder

2. es müssen große RF Felder existieren, die von corticalen Zellen kontrolliert werden (Valberg, 1974).

Ist ein monochromatisches Feld von einem Umfeld zunehmender Leuchtdichte umgeben, so nimmt der Farbeindruck des Infeldes ab, die Schwarzempfindung nimmt zu. Die Zunahme des Schwarzeindrucks könnte eine passive Folge des abnehmenden Farbeindrucks sein. Dann wäre eine Hemmung der farbspezifischen Ganglienzellen durch Umfeld der höherer Leuchtdichte die einfachste physiologische Erklärung für die Schwarzverhüllung. Gegen das passive Entstehen der Schwarzwahrnehmung spricht jedoch, daß keine Schwarzempfindung auftritt, wenn lediglich die Helligkeit einer Farbe verringert wird. Dabei wird der Farbton zwar auch blasser, und der Reiz erscheint dunkler, er sieht jedoch völlig anders aus, als ein schwarzverhüllter Reiz gleicher Helligkeit. Selbst wenn die Abnahme der Farbempfindung durch eine Reduzierung der Farbantworten retinaler Ganglienzellen verursacht wäre, müßte die Schwarzempfindung durch die Wirkung des Umfeldes erklärt werden, sei es durch Aktivierung der off-centre Zellen oder durch Verrechnung auf höherer Ebene.

Eine weitere Möglichkeit wäre, daß das Umfeld keinen Einfluß auf die Farbantworten der Ganglienzellen hat,

die Infeldsignale und Umfeldsignale würden erst auf höherer Ebene (Geniculatum oder Cortex) miteinander verrechnet. Bei allen Überlegungen setze ich voraus, daß jeder Wahrnehmungsänderung eine Signaländerung zu Grunde liegt. Bei allen Versuchen zur Schwarzverhüllung sollte das Infeld größer als die RF sein, um keine Vermischung mit dem Grenzkontrast herbeizuführen.

Um zwischen beiden Möglichkeiten zu entscheiden, müßten folgende Fragen geklärt werden.

1. Wie ändert ein Umfeld, das außerhalb eines RF liegt, die Antwortrate dieser Ganglienzelle?
2. Wie ändert sich die Antwortrate der off-centre Zellen im Infeld bei zunehmender Schwarzverhüllung?

Frage 1 gilt für farbspezifische Zellen, Frage 2 auch für unspezifische.

Um ein solches Experiment sauber durchzuführen, müßte aus vielen Ganglienzellen oder Fasern des Nervus opticus abgeleitet werden. Diese Möglichkeit hatte ich nicht. Ich habe deshalb in Zusammenarbeit mit Dr. Krüger an der Neurophysiologischen Klinik in Freiburg von 12 Neuronen im Geniculatum des Rhesusaffen abgeleitet. Wegen der geringen Neuronenzahl kann dies nur als Vorversuch gelten.

4.3.2. Methode

Ein Rhesusaffe (*macaca mulatta*) wurde mit Ketamin HCl (10mg/kg) anästhesiert. Danach wurde ein Muskelrelaxans gegeben (Flaxedil, Boehringer). Das Versuchstier wurde mit 30 Pulsationen pro Minute und 32 - 50 ml/P künstlich beatmet. Ausgatemeter CO₂-Gehalt und EKG wurden ständig registriert. Die rektale Temperatur wurde bei 37° C konstant gehalten. Die Pupillen wurden mit Atropinsulfat und Neosynephrin geweitet. Es wurde eine künstliche Pupille von 3mm Durchmesser verwendet.

Aktionspotentiale wurden mit einer glasisolierten Platinelektrode von Einzelzellen des linken Nucleus Geniculatum laterale (LGN) abgeleitet und auf einem Oszilloskop sichtbar gemacht. Ein CAT 400-Kanal Speicher sammelte die Antworten mehrerer Durchgänge und druckte sie als Zeithistogramme aus. Einzelheiten über das Reizgerät finden sich bei Krüger und Fischer (1976). Einen Meter vor dem Auge des Versuchstieres befand sich eine Projektionswand, auf die von der anderen Seite die Reize projiziert wurden. Die volle Intensität Weißlicht betrug 1000 cd/m².

Ich werde im folgenden die Neurone nach der Nomenklatur von Wiesel und Hubel (1966) benennen. Danach wird eine green on-centre/red off-surround Zelle von rotem Licht im Zentrum gehemmt, von grünem Licht erregt, im Umfeld ist es umgekehrt.

Dem Tier wurden Reize dargeboten, die der im ersten Teil der Arbeit verwendeten Konfiguration III entsprachen. Der Durchmesser des Infeldes betrug 10 cm, das entsprach 5.7° , der Außendurchmesser war 20 cm (11.5°). In- und Umfeld wurden subjektiv gleich hell eingestellt (400cd/m^2). Danach konnten mit zwei Neutralfiltern folgende subjektiven Helligkeitsverteilungen hergestellt werden:

Leuchtdichtevertellung 1: Infeld doppelt so hell wie das Umfeld.

Leuchtdichtevertellung 2: Infeld und Umfeld gleich hell.

Leuchtdichtevertellung 3: Infeld halb so hell wie das Umfeld.

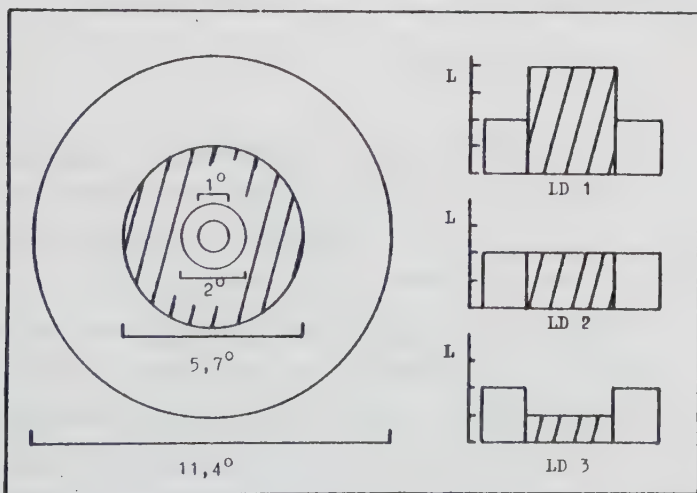


Abb. 4/14: Reisanordnung und Helligkeitsprofile.

Im Infeld ist die Größe eines rezeptiven Feldes eingetragen. Infeld: Monochromatisches Licht; Umfeld: Weißlicht.

Die RF, von denen abgeleitet wurde, lagen zwischen 10^0 und 15^0 von der Fovea entfernt.

In dieser Region beträgt die durchschnittliche Größe des RFZ $0.3 - 0.6^0$, die des ganzen RF 1^0 bis 3^0 (Wiesel und Hubel, 1966).

In- und Umfeld wurden auf das RF zentriert. Für einen Versuchsdurchgang wurden zwei Farben ausgewählt, die je eine Sekunde lang dargeboten wurden. Dazwischen lag eine Sekunde Dunkelheit. Ein Durchgang dauerte also 4 s. Die Entladungen von 10 Durchgängen wurden aufsummiert und als Histogramm ausgedruckt.

4.3.3. Ergebnisse

Abb. 4/15 zeigt je 40 Durchgänge mit und ohne weißes Umfeld, welche zu je 4 Histogrammen zusammengefaßt sind. Die gehemmte Entladung bei Rotbeleuchtung und die starke Zunahme der Entladung bei grünem Licht zeigen eine green on-centre/red off-surround Zelle an. Die Entladungsrate bei Dunkelheit kennzeichnet die Spontanentladungsrate der Zelle. Es handelt sich um eine tonische (sustained) Zelle, da die hohe Entladung für die Dauer der Reizung anhält. Die Zelle zeigt eine kleine Einschaltentladung, wenn das rote Licht projiziert wird. Weder grünes

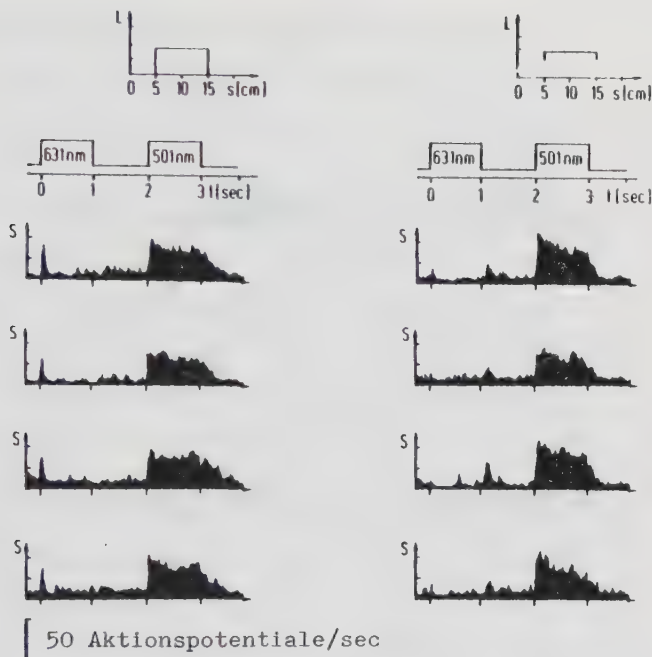


Abb. 4/15: Post-stimulus-Histogramm einer green on-centre/red off-surround D 1 Zelle, welche abwechselnd mit 631 nm und 501 nm belichtet wurde.

Oben: Leuchtdichteprofile, Mitte: zeitliche Reizfolge, Unten: Histogramme. Links ohne, rechts mit weißem Umfeld.

noch rotes Licht verursacht eine Ausschaltentladung (off-response). Das heißt, die Entladungsrate der Zelle wird ausschließlich vom Zentrum gesteuert.

Nach Einschalten des weißen Umfeldes, welches halb so hell wie das Testfeld war, ändert sich die "Grünentladung" nicht. Die Einschaltentladung bei Rotlicht wird deutlich gehemmt, während jetzt ein Ausschalt-signal sichtbar wird. Das außerhalb des RF liegende Umfeld verstärkt die RFU-Antwort, die Zentrumsantwort wird nicht erkennbar gehemmt. Die Zunahme der RFU-Antwort könnte durch Verstärkung oder Enthemmung erfolgen. Bei zunehmender Umfeldleuchtdichte könnte es noch zu einer Hemmung der Zentrumsantwort führen.

Um dies zu untersuchen, habe ich das Leuchtdichte-verhältnis, wie in Abb. 4/14 dargestellt, verändert.

1. 10 Durchgänge, Infeld allein dargeboten

10 Durchgänge, Infeld und Umfeld

$$L_i/L_u = 2 : 1$$

2. 10 Durchgänge, Infeld allein dargeboten

10 Durchgänge, Infeld und Umfeld

$$L_i/L_u = 1 : 2$$

Die oberen Histogramme zeigen eine deutliche Hemmung während der Beleuchtung mit Gelbrot (608 nm) und eine starke Zunahme der Erregung bei Gelbgrün (540 nm). Bei hoher Infeldhelligkeit wird auch die Einschaltentladung bei gelbrotem Licht erhöht. Ist das Umfeld halb so hell wie das Infeld, so zeigt sich eine Betonung der RFU-Antwort wie im vorhergehenden Versuch. Bei deutlich hellerem Umfeld

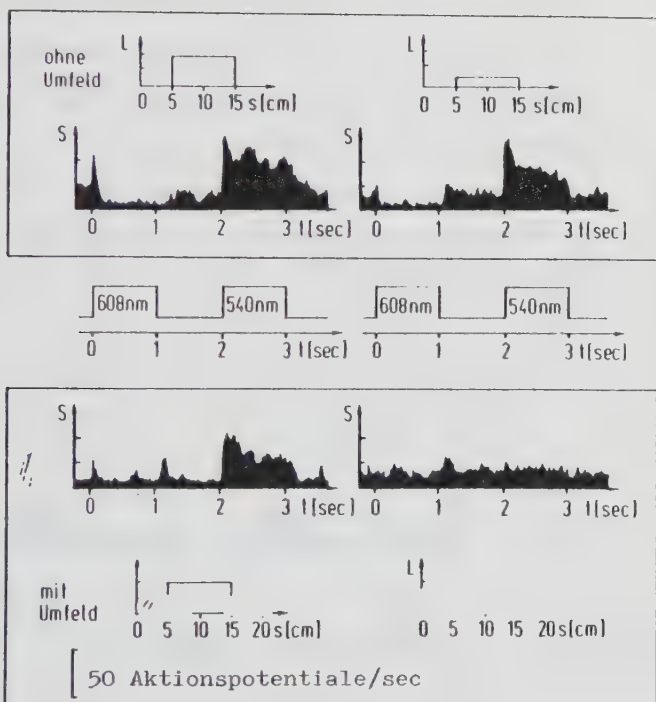


Abb. 4/16: Antworten einer green on-centre/red off-surround D 1 Zelle auf gelbrote und grüngelbe Farbreize mit und ohne weißes Umfeld. Oberer Block: Infeld allein dargeboten, zwei Helligkeitsstufen. Darunter zeitliche Reihenfolge eines Durchgangs. Unterer Block: Infeld und Umfeld, zwei Helligkeitsstufen.

verschwindet die tonische Entladung bei gelbgrüner Beleuchtung völlig. Die Zelle gibt kein farbspezifisches Signal mehr ab. Da die Beleuchtung des RF nicht verändert wurde, muß das Zentrumsignal durch lateral weitergeleitete Hemmung unterdrückt worden sein. Das Histogramm zeigt eine gleichförmige Spontanentladungsrate.

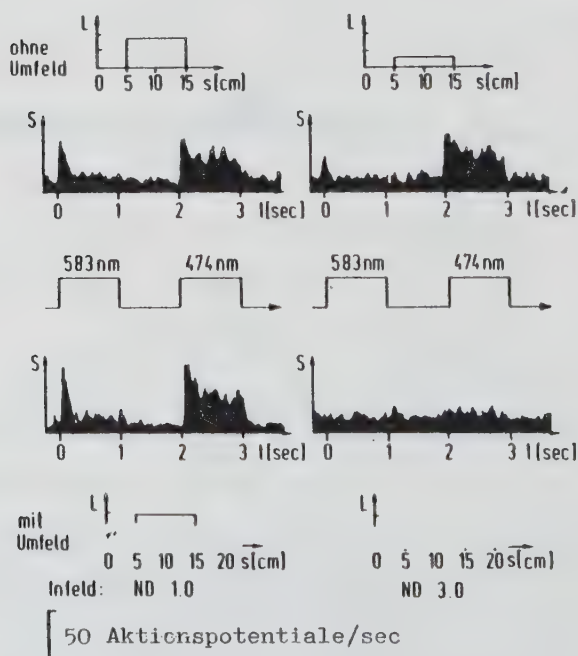


Abb. 4/17: Legende wie Abbildung 4/16.

Abbildung 4/17 zeigt denselben Versuch mit einem weiteren green on/red off Neuron, welches abwechselnd mit Gelb (583 nm) und Blaugrün (474 nm) beleuchtet wurde. Das Ergebnis ist dasselbe wie beim Versuch vorher.

Um zu sehen, in welchem Leuchtdichtebereich die Umfeldbeleuchtung hemmend auf die Entladungsrate des RFZ zu wirken beginnt, wurden nacheinander drei Leuchtdichteverhältnisse untersucht.

Abbildung 4/18 zeigt das Ergebnis.

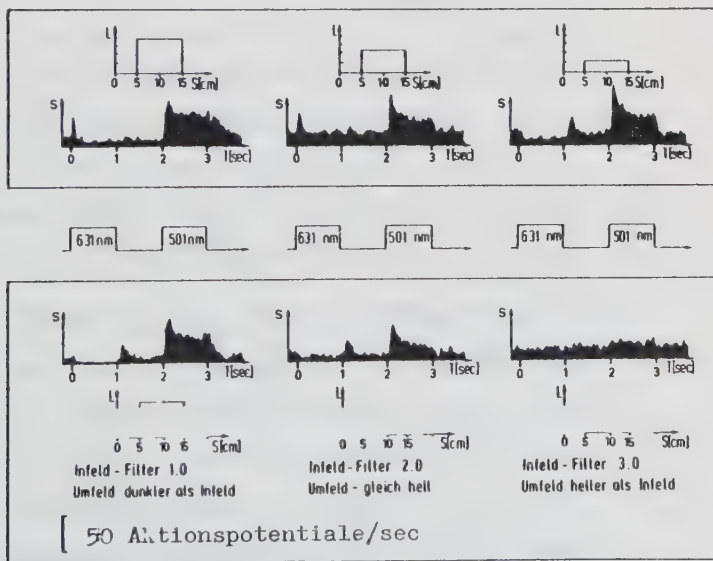


Abb. 4/18: Legende wie Abb. 4/16.

Leuchtdichteverhältnisse von links nach

rechts: $L_i/L_u = 2 : 1, 1 : 1, 1 : 2$.

Das Ergebnis zeigt die stufenweise Unterdrückung der Zentrumsantwort bei zunehmender Umfeldleuchtdichte. Solange noch eine Farbantwort vorhanden ist, wird die Ausschaltentladung verstärkt. Eine deutliche Verringerung der Farbantwort erfolgt erst, wenn die Leuchtdichte des Umfeldes die des Infeldes überschreitet. Die Hemmung während einer Rotbeleuchtung wird schon vorher verstärkt, ebenso die Ausschaltentladung.

4.3.4. Diskussion

Die untersuchten farbspezifischen Neuronen im Geniculatum des Rhesusaffen antworteten nicht mehr auf adäquate Beleuchtung, wenn der Farbreiz von einem weißen Umfeld hoher Leuchtdichte umgeben ist. Das Umfeld ist dabei außerhalb der Grenzen eines RF.

Damit läßt sich die Frage nach dem Ort der Interaktion teilweise beantworten. Die Hemmung der farbspezifischen Antworten durch Umfelder erfolgt in der Retina oder dem Geniculatum laterale. Da im Geniculatum keine RF gefunden wurden, die größer als 5° sind, ist Hypothese 2 (Seite 88) falsch. Da ich keine Ableitungen aus der Retina machen konnte, kann ich nicht entscheiden, ob die Wechselwirkung schon in der Retina stattfindet. Dennoch nehme ich dies an, da über Verschaltungen im Geniculatum nichts

bekannt ist und die bekannten retinalen Strukturen eine Erklärung zulassen.

Bisher gibt es noch keine Untersuchungen, bei denen die Umfelder wie in meinem Fall außerhalb des RF sind. Es gibt jedoch Daten mit Umfeldern, die noch in das RFU hineinreichen:

Werblin und Dowling (1969) zeigten, daß die Ganglienzellantworten in der Retina einer Molchart (*Necturus maculosus*) durch weiße Umfelder gehemmt werden. Dies gilt sowohl für farbspezifische wie nicht-spezifische Zellen. Die Antwortraten der Zapfen selbst zeigten keine Umfeldabhängigkeit, die Verminderung der Antworten erfolgte bei den Bipolarzellen. Die Hemmung, welche wahrscheinlich über die Horizontalzellen erfolgt, setzt also zwischen Zapfen und Bipolarzellen oder an den Bipolarzellen selbst an. Im zweiten Fall könnte die Hemmung auch über die Amakrinzellen verschaltet sein. Falls diese für den Molch und Fisch (Tomita, 1967) bekannten Mechanismen auch in der Primatenretina vorhanden sind, kann folgende Hypothese aufgestellt werden:

Fällt monochromatisches Licht auf die Fovea, so hyperpolarisiert es dort die Zapfen a, b und c, gemäß ihrer spektralen Empfindlichkeiten S_1 , S_2 und S_3 . Die Intensität des einfallenden Lichtes

wird von den Zapfen logarithmisch in ein graduiertes Potential übersetzt (Naka et al., 1969). Die Rezeptorantworten können dann so formuliert werden:

$$V_1 = k \log S_1$$

$$V_2 = k \log S_2$$

$$V_3 = k \log S_3$$

Dieses ist die erste Stufe der Verrechnung von Licht in der Retina. Da selbst kleine Umfelder die Hyperpolarisation der Zapfen nicht ändern (Werblin, 1972), nehme ich an, daß dies erst recht für weiter in der Peripherie liegende Umfelder gilt.

Die zweite Stufe der Verrechnung findet in den Bipolarzellen statt. Diese Zellen arbeiten mit Hyperpolarisation und Depolarisation. Die Bipolarzellen sind auf zwei Arten mit den Rezeptoren verbunden:

1. Direkte, dendritische Verbindungen
2. Indirekte, über die Horizontalzellen geschaltete Verbindungen.

Die Bipolarzellen haben, wie die retinalen Ganglienzellen, einen antagonistischen Aufbau mit RFZ und RFU. Es gibt ebenfalls on- und off-centre Zellen. In der Fovea treten meist red on-centre/ green off-surround Zellen, green on/red off, blue on/yellow off und yellow on/blue off Zellen auf.

Die red/green Zellen haben Verbindungen zu den rot und grün empfindlichen Zapfen, die yellow/blue Zellen zu allen drei Zapfentypen (DeMonasterio, Gouras und Tolhurst, 1975). Von den Bipolarzellen wird angenommen, daß sie die Zapfensignale linear als Differenzkodierung verarbeiten (Kvaal et al., 1974). Die Zellantworten der beiden häufigsten Bipolarzelltypen lassen sich dann so formulieren:

$$P_1 = c_1 V_1 - c_2 V_2 \quad (+ c_3 V_3 \text{ ?})$$

$$P_2 = c_2 V_2 - c_3 V_3$$

Die dritte Ebene der Signalverarbeitung in der Retina erfolgt in den Ganglienzellen, welche die graduierten Potentiale der Bipolarzellen in Impulsantworten überträgt. Die Antwortrate der Ganglienzellen kann durch die Aktivität der Amakrinzellen hemmend beeinflusst werden (Wiesel und Hubel, 1966).

Sollte die von mir im Geniculatum gemessene Verminderung der Farbantwort schon in der Retina erfolgen, so kämen für die laterale Ausbreitung der Hemmung nur die Horizontal- oder Amakrinzellen in Frage. Die Hemmsignale müßten über die gesamte Retina geleitet werden, um die großflächige Einfüllung zu erklären (zur Definition der Einfüllung, siehe Seite 85). Dabei scheint es sich um eine wirkliche Einfüllung zu handeln. Führt man zwischen In- und Umfeld einen schwarzen Ring ein, so wird

die Schwarzverhüllung stark abgeschwächt, oder sie tritt nicht auf (schwarzer Ring größer als 1^0). Schließt das Umfeld jedoch direkt an das Infeld an, so ist sofort das ganze Infeld einheitlich verdunkelt. Der Verhüllungsprozeß scheint von der Kontrastgrenze auszugehen und alle Neurone zu erfassen, deren RF im Infeld beleuchtet werden.

Solche weitreichenden oder globalen Effekte sind für die Retina bekannt. McIlwain (1964/1966) entdeckte den Peripherie-Effekt, der auch shift-effect genannt wird. Dieser Effekt läßt sich so beschreiben:

1. Ein unterschwelliger Reiz kann durch die Bewegung einer Kontrastgrenze im Gesichtsfeld überschwellig gemacht werden.
2. Die ruckartige Bewegung einer solchen Helligkeitsgrenze löst in den phasischen retinalen Ganglienzellen eine Erregung aus, die ähnlich der Erregung durch einen Lichtreiz ist.
3. Erfolgen Lichtreizung und Bewegung einer Kontrastgrenze gleichzeitig, so können sich beide Signale hemmen, die gemeinsame Antwort ist kleiner als jede Einzelantwort.

Der Effekt tritt in der gesamten Retina auf, und selbst Musterbewegungen in der äußeren Peripherie erregen foveale Ganglienzellen. Da die Ausbreitung

und Reizleitungsgeschwindigkeit der Horizontalzellen eine so schnelle und weite laterale Leitung nicht erklären können, wird heute angenommen, daß die laterale Ausbreitung des Peripherie-Signals über die Amakrinzellen geschieht (Gath et al., 1978). Obschon Amakrinzellen nur eine Ausdehnung von 200 μm haben (mudpuppy), können sie benachbarte Amakrinzellen noch in einem Abstand von 1 mm depolarisieren. Eine Zunahme der Erregung wird in den Amakrinzellen nur nach Beleuchtungsänderung der Retina gefunden (Werblin, 1972).

Die Depolarisierung von Amakrinzellen durch kurzzeitige Depolarisierung von benachbarten Amakrinzellen hat tonischen Charakter. Dabei bleibt die Fähigkeit der mit diesen Amakrinzellen verbundenen Bipolarzellen, phasische Signale weiterzuleiten, erhalten.

Welches psychophysische Korrelat diesen phasischen und tonischen Depolarisierungen entspricht, ist unbekannt. Cornsweet und Teller (1965) zeigten, daß bei Schwarzverhüllung die Schwelle für kleine Lichtblitze im schwarzverhüllten Infeld gleich bleibt, auch wenn die Umfeldleuchtdichte geändert wird. Aus diesen und meinen Befunden habe ich folgende Hypothese aufgestellt:

Blickt eine Versuchsperson auf eine Projektionswand, auf der ein farbiges Feld abgebildet ist,

welches von einem weißen Umfeld umgeben ist, so werden die RF, die an der Kontrastgrenze liegen, einem ständigen Beleuchtungswechsel unterworfen. Dafür sorgen die eigenständigen Augenbewegungen, die alle Primaten zeigen.

Die Amakrinzellen, welche mit den Bipolarzellen dieser RF verbunden sind, werden dadurch im Rhythmus der Augenbewegungen depolarisiert. Es wird also ein ganzer Amakrinzellring in der Retina phasisch depolarisiert. Sollten diese Zellen ihre benachbarten Amakrinzellen tonisch depolarisieren, wie Werblin beim mudpuppy fand, so könnte dies zu einer gleichmäßigen Depolarisierung aller eingeschlossenen Amakrinzellen führen, die einheitliche Verdunklung (Schwarzverhüllung) des Infeldes wäre damit geklärt. Da sich die Fähigkeit der im Infeld befindlichen Bipolarzellen, phasische Signale weiterzuleiten, nicht ändert, ist auch der Befund von Cornsweet und Teller (1965) erklärbar.

Die einheitliche Depolarisierung der Amakrinzellen würde zu einer gleichmäßigen Hemmung aller damit verbundenen Ganglienzellen führen. Damit wäre die von mir gemessene Verminderung der farbspezifischen Antworten schon auf retinaler Ebene erklärt. Die Einfüllung bestünde also aus einer von der Kontrastgrenze ausgehenden einheitlichen Depolarisierung aller im I feld beleuchteter Amakrinzellen, was zu

der beobachteten einheitlichen Schwarzverhüllung des Testreizes führt.

Eine Reduzierung der Antworten habe ich erst bei Umfeldleuchtdichten gefunden, die höher als die Infeldleuchtdichten waren. Dies stimmt mit meinen psychophysischen Beobachtungen überein, wonach Schwarzverhüllung erst auftritt, wenn die Helligkeit des Umfeldes die des Infeldes überschritt.

Die Stärke der Schwarzverhüllung hängt auch von der räumlichen Anordnung von In- und Umfeld ab (Wässle und Heinrich, 1970). Als Regel gilt: Je größer das Umfeld und je näher es am Infeld liegt, desto größer ist die Verhüllung. Sie nimmt auch noch mit zunehmendem Kontrastunterschied zu.

Auch diese psychophysische Beobachtung ist mit der vorhergenannten Hypothese erklärbar, denn je mehr Amakrinzellen phasisch depolarisiert werden, desto größer muß die Wirkung auf benachbarte Zellen sein. Da ein schwarzer Ring zwischen In- und Umfeld den Effekt abschwächt oder gar beseitigt, nehme ich an, daß eine Beeinflussung benachbarter Amakrinzellen die größte Wirkung hat, wenn diese durch Beleuchtung selbst hyperpolarisiert sind. Ein Ring von Amakrinzellen, deren rezeptive Felder nicht beleuchtet werden, scheint die laterale Reizleitung zu blockieren.

Ich habe angenommen, daß der Einfüllvorgang an der Figurgrenze durch schnelle Beleuchtungswechsel

hervorgerufen wird, die auf Augenbewegungen beruhen. Das bedeutet, daß bei fehlenden Augenbewegungen keine Einfüllung erfolgt. Die Reizkante selbst müßte ebenfalls nach einiger Zeit wegen Adaptation verschwinden. Dies wird auch tatsächlich beobachtet (Riggs und Ratliff, 1952; Riggs et al., 1953).

Durch einen optischen Trick stabilisierten Riggs et al. (1953) das retinale Bild, und nach wenigen Sekunden verschwand jede visuelle Wahrnehmung. Zuerst verschwanden farbige Flächen, dann achromatische Flächen und zuletzt Kontrastgrenzen.

Auch unter normalen Beobachtungsbedingungen werden Einfüllvorgänge wahrgenommen. Der blinde Fleck, der wahrnehmungsmäßig der Eintrittsstelle des Sehnerves in die Retina entspricht, wird ständig mit der Farbe und Helligkeitswahrnehmung der benachbarten Flächen eingefüllt (Walls, 1954). Selbst bei monokularer Betrachtung sehen wir keinen Schatten auf einer weißen Wand. Im Zustand der Dunkeladaptation können wir mit der stäbchenfreien Fovea nichts wahrnehmen, was skotopische Leuchtdichte hat. Dennoch sieht ein weißes Papier einheitlich weiß aus, 2^0 große schwarze Punkte, die mit der Fovea fixiert werden, können nicht wahrgenommen werden (Walls, 1954). Auch im helladaptierten Zustand können wir Einfüll-

prozesse sichtbar machen. Die innere Fovea (0.5°) ist frei von "blauempfindlichen" Zapfen (Williams et al., 1978). Bei einer perimetrischen Untersuchung kann eine Vp keine kleinen blauen Punkte mit dieser Netzhautstelle wahrnehmen, blaue Flächen dagegen werden wiederum einheitlich wahrgenommen.

Liegt jeder Wahrnehmungsänderung eine physiologische Signaländerung zugrunde, so muß für alle diese Einfüllvorgänge eine laterale Erregungsleitung angenommen werden, durch die eine Umfeldinformation auf eine nicht oder anders gereizte Fläche übertragen wird. Im Falle der Schwarzverhüllung handelt es sich um eine Wahrnehmungsunterdrückung (ein bunter Farbton verschwindet), im Falle einer Skotomeinfüllung um eine Wahrnehmungserzeugung, wo kein adäquater physikalischer Reiz vorhanden ist. Da sowohl Hemmung als auch Erregung auf Signaländerungen beruhen, muß für beide Vorgänge eine Struktur gefordert werden, die eine laterale Ausbreitung dieser Signaländerungen übernimmt. Für die laterale Signalleitung in der Retina stehen dafür zwei Zellschichten zur Verfügung, die Horizontalzellschicht und die Amakrinzellschicht.

Um die von mir angenommene Einfüll-Hypothese für Flächenkontraste sicherer zu machen, müßten noch folgende Experimente gemacht werden:

1. Es muß aus retinalen Ganglienzellen abgeleitet werden.
2. Es muß sowohl aus on-centre wie auch off-centre Zellen abgeleitet werden.
3. Die Anzahl der Neurone müßte größer sein als in meinem Experiment.

5. Zusammenfassende Diskussion

5.1. Vergleich der Ergebnisse für Weiß und Schwarzverhüllung.

Zum besseren Vergleich zeige ich beide Ergebnisse in einem Bild (Abb. 5/1).

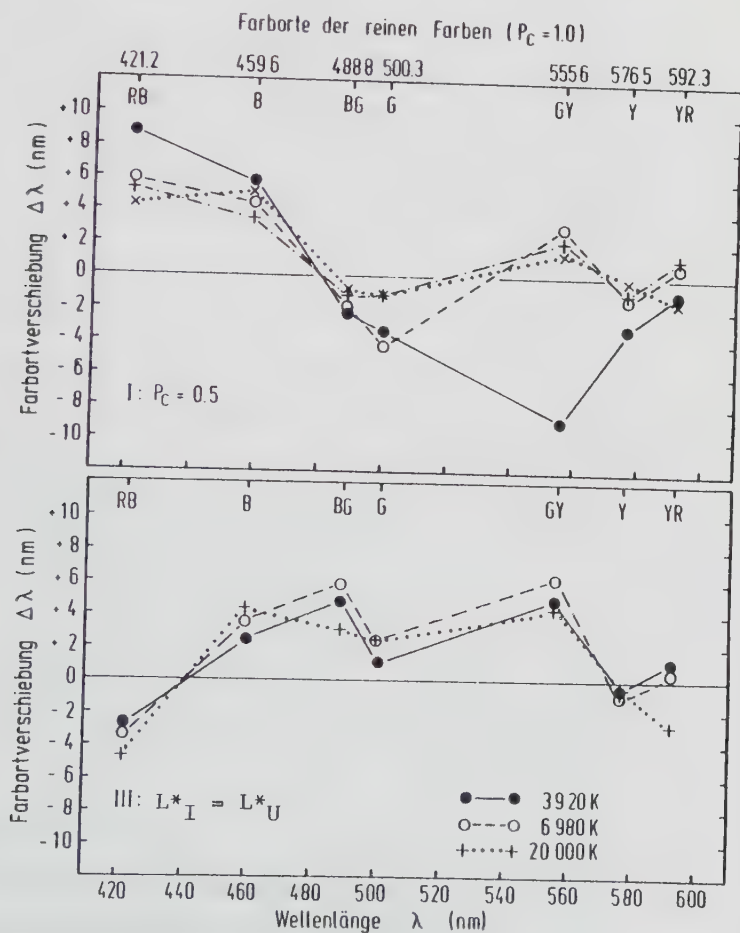


Abb. 5/1: Farbortverschiebung als Funktion der Intensität von Weißlicht im In- und Umfeld (Konfiguration I und III).

Vermischt man monochromatisches Licht mit Weiß, so hängen Richtung und Betrag der Farbortverschiebungen von der Art des Weißlichtes ab. Weißes Licht im Umfeld ruft ebenfalls eine Farbtonveränderung hervor, diese ist jedoch von der Art des verwendeten Weiß unabhängig. Abbildung 5/1 zeigt oben die Ergebnisse für Weißverhüllung, unten die für Schwarzverhüllung. Der zweite auffallende Unterschied ist die starke Veränderung der kurzwelligen Farben bei Mischung mit Weiß, welche mit weißem Umfeld nicht auftritt.

Da im ersten Fall die spektrale Zusammensetzung der Reize verändert wurde, änderte sich auch das Verhältnis der Zapfenmeldungen zueinander. Gelbliche Weißtöne werden die Antwortrate des "Rotrezeptors" und "Grünrezeptors" erhöhen, bläuliches Weiß die des "Blaurezeptors". Die Abhängigkeit der Farbortverschiebungen bei Weißverhüllung von der Art des Weißlichtes ist damit erklärbar. Wird Weiß im Umfeld dargeboten, so hängt die Veränderung des Farbtönen vom Leuchtdichte-verhältnis zwischen In- und Umfeld ab.

Ein rotblauer Reiz erscheint bei Mischung mit Weiß rötlicher, mit weißem Umfeld bläulicher. Die Unterschiede zwischen den Weißarten lassen sich durch deren "Farbton" erklären. Die Urfarbe Blau erscheint unter beiden Bedingungen rötlicher, der Effekt ist weniger stark als bei Rotblau.

Bei 3 der untersuchten 7 Farben ist die Richtung der Farbtonverschiebung für beide Verhüllungen entgegengesetzt (RB, BG und G), für zwei Farben geht sie in die gleiche Richtung (B, GY).

Unter natürlichen Bedingungen treten Weiß- und Schwarzverhüllung gemeinsam auf, wenn alle Oberflächen gleichmäßig vom Sonnenlicht bestrahlt werden. Haben die Farbortverschiebungen für die beiden Bedingungen unterschiedliche Richtungen, so könnten sie sich kompensieren und die Farbbänderungen wären vor allem im kurzwelligen Bereich gering.

Bei der von mir untersuchten Konfiguration II wurde weißes Licht im In- und Umfeld projiziert und eben diese Bedingung geschaffen. In Abbildung 5/2 habe ich für zwei Versuchspersonen die Farbortverschiebungen bei allen drei Konfigurationen für je 1 Farbe aufgetragen. Von links nach rechts ist ablesbar, wie sich der Farbort einer Farbe veränderte, wenn nur im Infeld (I), im In- und Umfeld (II) und nur im Umfeld (III) weißes Licht zugemischt wurde. Aus Abbildung 5/2 lassen sich drei Gruppen von Farben zusammenfassen:

1. Farben, bei denen Weiß- und Schwarzverhüllung keine Farbtonänderung hervorrufen. Dies gilt für Gelb und bei Vp T auch für Blaugrün und Grüngelb.

2. Farben, bei denen die Farbänderung in derselben Richtung erfolgte, Blau, Grüngelb und Gelbrot (Vp G).
3. Farben, bei denen entgegengesetzte Farbänderungen auftraten, wie bei Rotblau, Blaugrün und Grün.

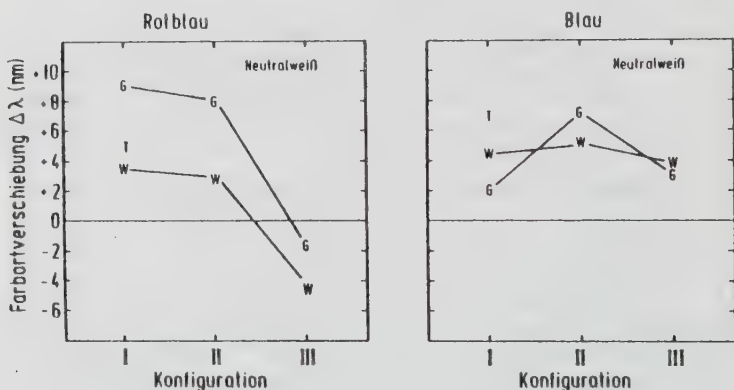


Abb. 5/2: Farbortverschiebung der Farben Rotblau und Blau bei 3 Konfigurationen. Kurvenparameter sind die Vpn. Die Vp T hat nur bei Experiment I teilgenommen.

Gelb veränderte seinen Farbort unter keiner Bedingung und ist somit eine "unveränderliche Farbe" bezüglich Weiß- und Schwarzverhüllung.

Gingen die Farbortverschiebungen für beide Bedingungen in die gleiche Richtung, so summierten sich die Effekte bei gleichzeitiger Darbietung nicht. Einzige Ausnahme ist die Zunahme der Rot-

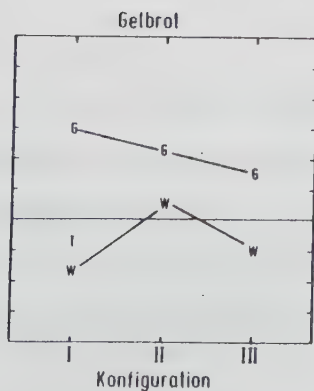
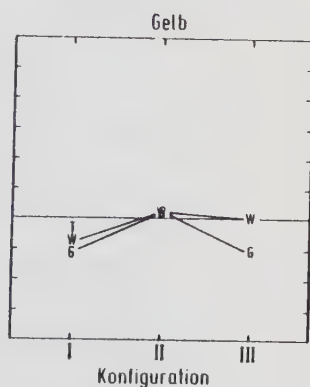
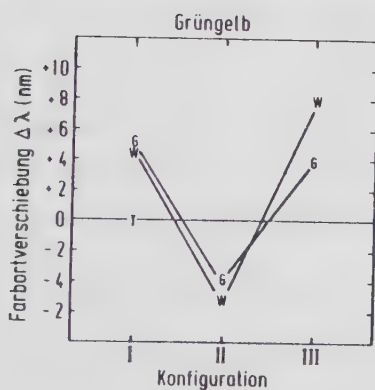
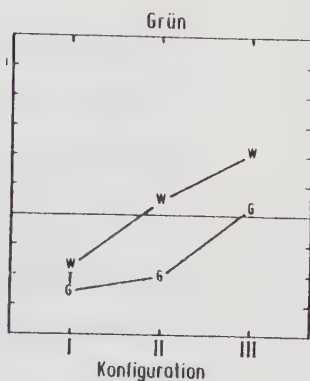
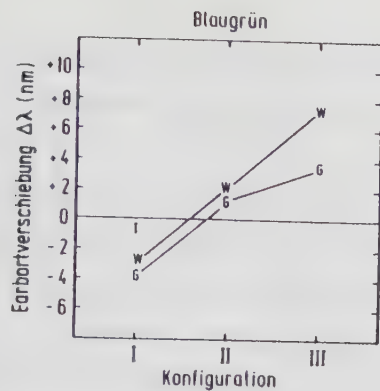


Abb. 5/2: Legende
siehe Seite vorher.

empfindung bei der Farbe Blau (Konfiguration II). Bei Vp WK ist die Rotempfindung bei allen drei Konfigurationen gleich stark. Bei allen anderen Fällen dieser Art ist die Farbortverschiebung bei Konfiguration II kleiner als die für Konfiguration I und II allein. Der zentrale und der laterale Effekt scheinen sich zu hemmen. Krassestes Beispiel ist Gelbgrün, wo sowohl Konfiguration I wie auch III eine Verschiebung nach Grün verursachen, Konfiguration II jedoch nach Gelb.

Haben Weiß- und Schwarzverhüllung antagonistische Wirkung, so liegen die Verschiebungen bei Konfiguration II immer zwischen diesen Werten. Beispiele dafür sind Rotblau, Blaugrün und Grün.

Alle Befunde zusammen zeigen, daß beide Effekte sich gegenseitig hemmen. Das heißt anders ausgedrückt, zentrale und laterale Signale werden hemmend miteinander verschaltet.

5.2. Unveränderliche Farben

Allen drei Vpn gemeinsam sind drei Farbtöne (Abb. 4/3 - 4/4), welche keine Farbänderung bei Veränderung der Sättigung aufweisen. Davon wurden zwei Farben direkt gemessen (Blaugrün und Gelb), und eine (Grün) aus der Farbortkurve extrapoliert.

Diesen Nullstellen, die auch unveränderliche Farben genannt werden (invariant hues), kommt eine besondere Bedeutung zu. Hurvich und Jameson (1955) stellten die Hypothese auf, wonach es im menschlichen Sehsystem zwei Farbmechanismen gibt, von denen einer die Meldung Rot/Grün übertragen soll, der andere Blau/Gelb. Die grundlegende Idee dazu hatte schon Hering. Die Farbwahrnehmung ist nach diesem Modell vom Verhältnis der Antworten dieser beiden Farbkanäle bestimmt. Die Antwortstärke soll mit der Reizstärke gekoppelt sein.

Mit dieser Hypothese wird z.B. der Bezold-Brücke-Effekt erklärt, bei dem Spektralfarben mit zunehmender Intensität gelblicher oder bläulicher erscheinen (Purdy, 1931). Daraus wird geschlossen, daß bei Intensitätserhöhung die Antworten des Blau/Gelb Kanals stärker zunehmen als die des Rot/Grün Kanals. Farben, bei denen nur ein Kanal aktiviert wird, oder beide Kanäle bei einer Erhöhung der Intensität gleich stark erregt werden, sollten keine Farbänderung erfahren. Solche intensitätsunabhängigen Farben nennt man unveränderliche Farben bezüglich des Bezold-Brücke-Effekts.

Schon Westphal (1909) berichtete, daß Urblau (478.4 nm) und Urgelb (574.5 nm) ihren Farbort bei Zunahme der Intensität nicht veränderten.

Westphal erwähnt auch, daß diese Farben ihren Farbort nicht änderten, wenn ihre Sättigung verändert wurde. Purdy (1931) ermittelte zwei intensitäts-unveränderliche Farben, Blaugrün (476 nm) und Gelb (576 nm). Bei Addition von Weißlicht blieb ebenfalls der Farbort Gelb (576 nm) gleich, das Blau erschien rötlicher. Westphal, wie auch Abney und Purdy verwendeten kein neutrales Weiß zur Sättigungsveränderung, wodurch alle langwelligen Farben gelblicher erschienen (Abb. 4/5). Kleine Farbtonveränderungen des Gelb sind unter diesen Bedingungen nicht meßbar. Nur von einem Neutralweiß kann angenommen werden, daß es die Antwortrate der beiden Farbkanäle im gleichen Verhältnis ändert.

Neben den oben zitierten Angaben habe ich keine weitere Literatur zu den unveränderlichen Farben des Abney-Effektes gefunden. Für die Farben, welche unveränderlich bezüglich einer Intensitätsänderung sind, werde ich IU-Farben schreiben, für Farben, die bezüglich einer Sättigungsänderung unveränderlich sind, SU-Farben. Zur Ermittlung der von mir gemessenen SU-Farben habe ich die Durchschnittskurve von Abb. 4/5, gewonnen mit Neutralweiß, verwendet. Die unveränderlichen Farben der einzelnen Vpn. zeigt Tabelle 5/1.

Tabelle 5/1 : Farborte der Farben, die ihren Farbort bei verringerter Sättigung nicht änderten (SU-Farben).

Vp	Blaugrün	Grün	Gelb
WK	480	522	576
TLA	484		
GH	470	530	577

Die Farbortkurven der Vp TLA besaßen im mittel- und langwelligen Bereich keine Nulldurchgänge.

Da nicht nur Gelb, sondern auch Gelbgrün und Gelbrot unverändert blieben, habe ich für diese Vp keine SU-Farben in diesem Bereich angegeben (siehe Abbildung 4/4).

Aus diesen individuellen Meßwerten ergeben sich die durchschnittlichen Farborte der unveränderlichen Farben:

Blaugrün (479 nm) und Gelb (576 nm).

Die dritte Nullstelle liegt zwischen Grün (500.3 nm) und Grüngelb (555.6 nm) und kann nach den bisherigen Daten nur geschätzt werden. Da ich nicht weiß, wie die Farbortverschiebungen in diesem Bereich sind, ist dieser Nulldurchgang sehr unsicher. Nach Abbildung 4/5 läge der Wert bei 535 nm.

In der nächsten Tabelle habe ich die von mehreren Autoren gefundenen IU-Farben zusammengestellt und

mit den von mir gefundenen SU-Farben verglichen.

Tabelle 5/2: Unveränderliche Farben bezüglich des
Bezold-Brücke Effektes (*) und des
Abney-Effektes (o).

Autor	Blaugrün	Gelb
Westphal (1909)	478 nm (*) (o)	574 nm (*) (o)
Purdy (1931)	476 nm (*)	576 nm (*) (o)
Jameson und Hurvich (1951)	473 nm (*)	583 nm (*)
Boyton und Gordon (1965)	466 nm (*)	579 nm (*)
Jacobs (1967)	475 nm (*)	583 nm (*)

Kurtenbach	479 nm (o)	576 nm (o)

Diese beiden Farbtöne sind also bezüglich einer Intensitätsveränderung wie auch Sättigungs-änderung unveränderlich. Das heißt im Modell von Hurvich und Jameson, daß bei der Addition von Neutralweiß zu den Wellenlängen 479 und 576 nm sich das Antwortverhältnis der beiden Farbkanäle zueinander nicht ändert oder sich die Eingangssignale eines Kanals weiterhin zu Null addieren, so daß nur ein Kanal antwortet.

Sollte das zweite zutreffen, so müßten die beiden unveränderlichen Farben Komplementärfarben sein und das jeweilige IN-Weiß auf der Verbindungs-

Die Abbildung zeigt, daß die Farborte der IN-Weißlichter im CIE-Diagramm sehr nahe den Verbindungslinien der individuellen unveränderlichen Farben liegen. Bei Vp TLA waren Grüngelb, Gelb und Gelbrot unveränderliche Farben. Um trotzdem einen Farbort eintragen zu können, habe ich den Urfarbort Gelb gewählt, der auch bei den anderen Vpn eine unveränderliche Farbe war. Nach diesem Befund scheinen die unveränderlichen Farben tatsächlich den Gleichgewichtspunkt eines oder beider Farbkanäle widerzuspiegeln.

5.3. Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren.

Bisher ist der Versuch Abneys noch nicht wiederholt worden. Meine Ergebnisse habe ich schon in Kapitel 4.1. mit denen Abneys verglichen. Die mit Farbmischexperimenten* gewonnenen Daten geben Auskunft über Farbortverschiebungen als Funktion der Sättigung ohne die Beteiligung von Weißlicht. Diese Ergebnisse, die als Farbortkurven im CIE-Diagramm vorliegen (Abb. 5/4), können in eine Darstellung überführt werden, die der Abneys entspricht (Abb. 5/5).

Würden bei einer Veränderung der Sättigung keine Farbänderungen auftreten, so würden die Orte unter-

*siehe Einleitung Seite 16 und 17

schiedlicher Sättigung eines Farbtone auf einer Geraden im CIE-Diagramm liegen. Dies trifft auf die unveränderlichen Farben zu. MacAdam findet gerade Farbortkurven bei Rotblau und Gelb, während Valberg (1971) solche bei Grün und Gelb findet. Diese Unterschiede zeigen schon einen Nachteil der CIE-Darstellung. Im rotblauen Bereich liegen die Wellenlängen 460 nm bis 400 nm sehr eng beieinander. Farbortverschiebungen, die selbst 20 nm betragen, würden nur eine schwache Krümmung der Farbortkurve verursachen, während im grünen und gelben Bereich schon kleine Farbortverschiebungen von wenigen nm die Farbortkurven stark krümmen würden. Dies macht eine genaue Bestimmung der Größe der Verschiebung im rotblauen und roten Spektralbereich schwierig.

Wie schon in der Einleitung ausgeführt, wird der Grad der Buntheit einer Farbe als Sättigung bezeichnet. In der Farbvalenzmetrik wird die Sättigung durch das Verhältnis von Spektralfarbe zu Weißlicht angegeben, wobei entweder trichromatische Einheiten verwendet werden (spektraler Farbanteil P_e) oder photometrische Einheiten (colorimetrische Reinheit P_c). Gleiche Abstände im CIE-Diagramm kennzeichnen gleiche P_e -Abstände. Zum Vergleich mit meinen Daten müssen die P_e -Werte aus dem CIE-Diagramm in P_c -Werte umgewandelt werden.

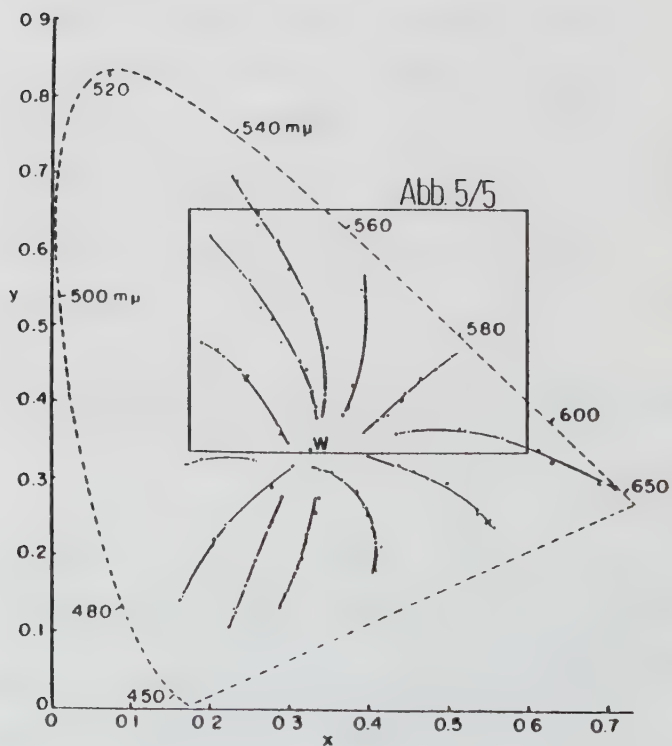


Abb. 5/4: Orte gleichen Farbtones im CIE-Diagramm bei dunklem Hintergrund und einem 10° großen Testfeld. Verändert nach MacAdam (1950).

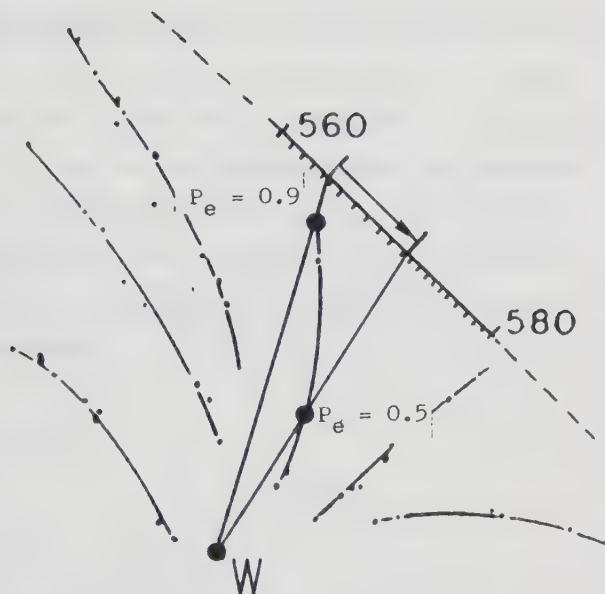


Abb. 5/5: Ermittlung der Farbortverschiebung aus den Linien gleichen Farbortes im DIE-Diagramm am Beispiel der Farbe Grün gelb. Eingetragen ist bei einer Änderung des spektralen Farbanteiles von $P_e = 0.9$ bis $P_e = 0.5$. Die Farbortverschiebung beträgt 7 nm in Richtung der längeren Wellenlängen.

Ein Nachteil der Farbmischexperimente ist, daß die Farbmischungen mit Filtern hergestellt werden, deren spektrale Reinheit keine Messungen bei hoher colorimetrischer Reinheit erlauben.

MacAdams Messungen im blauen und grünen Bereich beginnen bei $P_e = 0.6$. Der Farbort auf dem Farbzug ($P_e = 1.0$) müßte aus den Kurven extrapoliert werden, was keine genauen Daten bringt. Ich habe aus diesen Gründen die Daten MacAdams nur qualitativ mit meinen verglichen, meine Ergebnisse aber in CIE-Koordinaten umgerechnet, was einen bestmöglichen optischen Vergleich zuläßt.

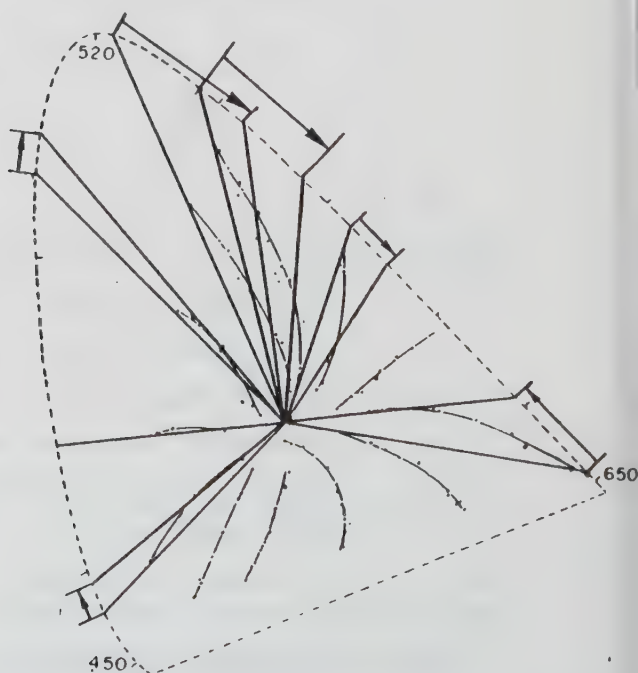


Abb. 5/6: Ermittlung der Farbortverschiebungen aus den Linien gleichen Farbtones im CIE-Diagramm für 7 Farbtöne.

Die Pfeile kennzeichnen die Farbortverschiebungen.

Tabelle 5/3: Richtung der Farbortverschiebungen
bei Veränderung der Sättigung für
7 Farbtöne. Vergleich der Farbmisch-
daten mit den Farbe-plus-Weiß Daten.

Farbe	Richtung der Farbortverschiebung	
	MacAdam	Kurtenbach
Rotblau	+	+
Blau	+	+
Blaugrün	0	0
Grün	+	-
Grüngelb	+	+
Gelb	0	0
Gelbrot	-	+

Die Zeichen kennzeichnen die Richtung, in welche der monochromatische Reiz verschoben werden mußte, damit der Farbton der reinen Farbe wieder wahrgenommen wurde. Plus = Verschiebung in den längerwelligen Bereich, Minus = Verschiebung in den kürzerwelligen Bereich, 0 = keine Verschiebung.

Der Vergleich zeigt, daß bei fünf Farben die Veränderung des Farbtones als Funktion der Sättigung bei beiden Versuchsarten übereinstimmt. Bei Grün kommt es darauf an, welchen Sättigungsbereich man wählt. MacAdam hat nur Werte zwischen $P_e = 0.5$ und $P_e = 0.05$ gemessen. In diesem Bereich liegen keine

Daten aus meinem Experiment vor. Zwischen $P_e = 0.5$ und $P_e = 0.8$ findet MacAdam eine positive Verschiebung, unterhalb $P_e = 0.5$ eine negative. Für Tab. 5/3 habe ich angenommen, daß die Farbortverschiebung zwischen $P_e = 1.0$ und 0.5 stetig verläuft, und habe deshalb ein + eingetragen, auch wenn es sich nicht mit meinen Daten deckt. Es soll jedoch angemerkt werden, daß diese Verschiebung klein und nur extrapolierend gewonnen wurde.

Die zweite Farbe, bei der keine Übereinstimmung besteht, ist Gelbrot. MacAdam hat ein Gelbrot gewählt, dessen spektraler Farbort bei 640 nm liegt. Bei meinem Versuch wurde ein gleichanteiliges Gelbrot gewählt, dessen spektraler Farbort bei 592 nm liegt. MacAdam hat noch ein zweites Gelbrot untersucht, dessen spektraler Farbort 585 nm beträgt. Bei diesem Gelbrot, das sehr nahe dem Urgelb liegt, findet MacAdam ebenfalls eine positive Verschiebung, was meinem Befund entspricht.

MacAdam hat die Linien gleichen Farbtönen auch mit hellem Umfeld gemessen, was der von mir untersuchten Konfiguration II entspricht. Abb. 5/7 zeigt seine Darstellung im CIE-Diagramm. Die von MacAdam mit weißem Umfeld gemessenen Farbortverschiebungen sind, mit einer Ausnahme bei Blau, kleiner als die mit dunklem Umfeld. Dies stimmt mit

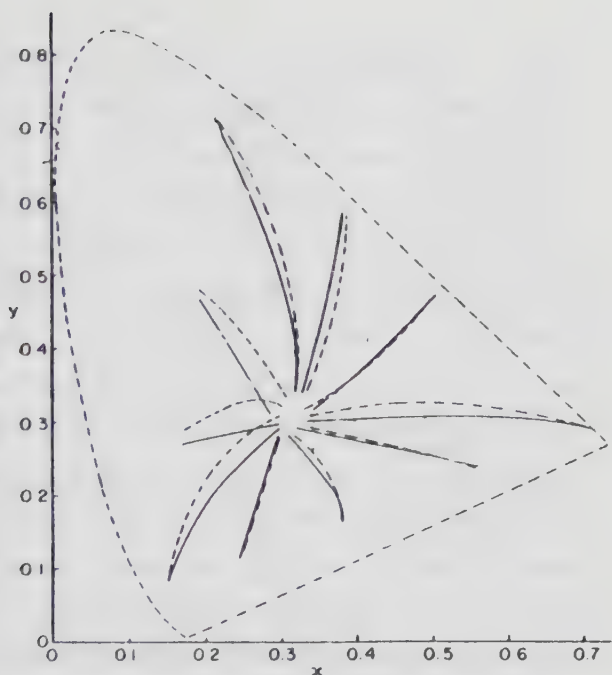


Abb. 5/7: Linien gleichen Farbtones bei weißem Umfeld (MacAdam, 1950) für 2 Vpn(----).

meinen Ergebnissen überein. In Abb. 5/7 sind die Kurven für 2 Vpn eingetragen. Beide Versuchspersonen weichen trotz Farbnormalität voneinander ab. Eine solch große individuelle Streuung trat auch bei mir auf. Selbst Vpn, die sehr ähnliche Ur- und Zwischenfarborte haben, weichen in ihren sättigungsabhängigen Farbänderungen stark voneinander ab. Die Übereinstimmung meiner Ergebnisse mit diesen von MacAdam ist eben so gut wie bei Konfiguration I.

Siegel und Siegel (1971) haben mit einer Farbbenennungsmethode 48 Wellenlängen nach ihrem Farbton beurteilen lassen. Als Antworten waren die von mir ebenfalls verwendeten Farbnamen zugelassen: Rotblau, Blau, Blaugrün, Grün, Grüngelb, Gelb, Gelbrot und Rot. Eine Farbe konnte mit mehreren Namen belegt werden, z.B. 10% Rotblau, 90% Blau usw. Trägt man die Häufigkeit der Antworten für jeden zugelassenen Farbnamen als Funktion der Wellenlänge auf, so ergeben sich acht Farbvalenzkurven (Abb. 5/8). Siegel und Siegel haben solche Farbvalenzkurven für drei Umfeldhelligkeiten aufgenommen, die Kurven jedoch nicht vergleichend aufgetragen und deshalb nur die Veränderung der Maxima und der Halbwertbreite auswerten können.

Die Umfeldleuchtdichten bei ihrem Versuch waren 0.1, 0.5 und 1.0 fL, was 0.3424, 1.712 und 3.424 candela pro m^2 entspricht. Bei einem angenommenen Pupillendurchmesser von 3 mm ergeben sich die retinalen Beleuchtungsstärken 3.082, 15.41 und 30.82 Troland. Die von mir verwendeten Umfeldleuchtdichten waren 2.1, 4.2 und 14 Troland. Abb. 5/8 zeigt die übereinander gelegten Farbvalenzkurven.

Bei Erhöhung der Umfeldleuchtdichte fanden Siegel und Siegel keine Veränderung der Antwort-

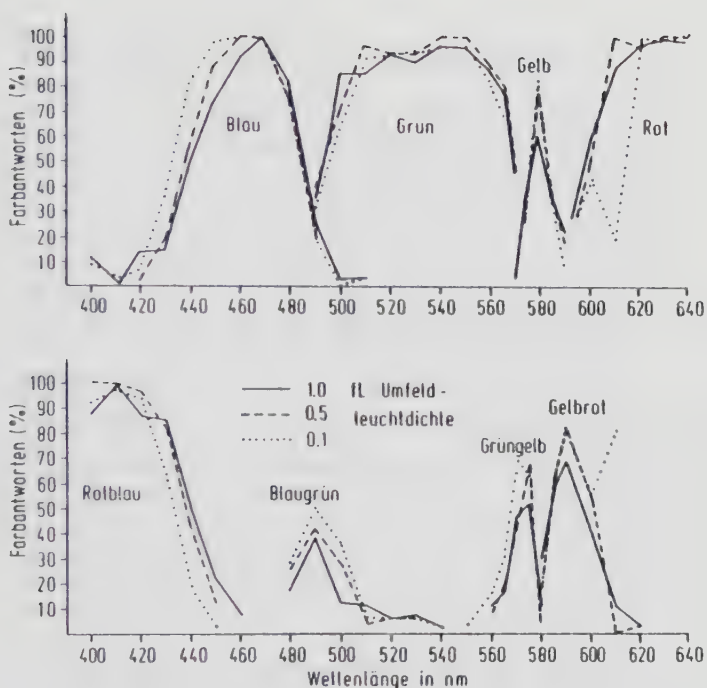


Abb. 5/8: Farbvalenzkurven für 4 Ur- und Zwischenfarben bei 3 Umfeldleuchtdichten. Die colorimetrische Reinheit der Farben ist $P_C = 1.0$. (Nach Siegel und Siegel, 1971).

maxima bei 7 Farbtönen. Grün gelb veränderte seinen Farbort um 5 nm in Richtung der längeren Wellenlängen. Der von mir gefundene Wert beträgt 6 nm. Aus der Gleichheit der restlichen Antwortmaxima folgern Siegel und Siegel, daß sich die Farborte bei Erhöhung der Umfeldleuchtdichte nicht ändern. Diese Schlußfolgerung ist falsch, wie ich am Beispiel

der rotblauen und blauen Farbe erklären werde. Bei der kleinsten Umfeldleuchtdichte erhielten die Wellenlängen 450 - 470 nm ausschließlich die Antwort Blau. Diese Wellenlängen enthielten demnach keine roten und grünen Anteile. Bei zunehmender Umfeldleuchtdichte treten zwischen 450 und 460 nm zunehmend Rotblau Antworten auf, während gleichzeitig die Blauantworten abnehmen. Das heißt, die Wellenlängen 450 - 460 nm sehen jetzt rötlicher aus. Errechnet man die Verschiebung des durchschnittlichen Maximums, so ergeben sich pro Helligkeitsstufe 5 nm, gegenüber 4 nm, die ich gemessen habe.

Dieses Beispiel zeigt, daß der Vergleich der relativen Antwortverteilung eine Farbortverschiebung sichtbar macht, die sich aus dem Vergleich der flachen Maxima allein nicht ansehen läßt. Ich habe nach der obigen Methode die Daten von Siegel und Siegel qualitativ ermittelt und in Tabelle 5/4 mit meinen Befunden verglichen. Die genaue Größe der Verschiebungen läßt sich nicht in allen Fällen aus den Valenzkurven ermitteln, da sowohl die Farbbenennungsmethode, als auch die Art der Darstellung zu ungenau sind. Die qualitative Übereinstimmung der Ergebnisse ist gegeben.

Tabelle 5/4:

Farbe	Richtung der Farbortverschiebungen	
	Siegel und Siegel	Kurtenbach
Rotblau	-	-
Blau	+	+
Blaugrün	0	+
Grün	+	+
Grüngelb	+	+
Gelb	0	0
Gelbrot	0	0

(Legende siehe Tabelle 5/3)

5.4. Darstellung der Ergebnisse im CIE-Diagramm

Um die von mir gemessenen Farbortverschiebungen als Funktion der colorimetrischen Reinheit in das CIE-Diagramm übertragen zu können, müssen die geometrischen Orte des entsprechenden spektralen Farbanteils errechnet werden. Dazu muß der Ort auf dem Farbenzug bekannt sein, den ich bei meinem Versuch direkt erhielt. Die Transformation der colorimetrischen Reinheit in den spektralen Farbanteil erfolgte mit zwei Gleichungen:

$$y = \frac{y_b y_w}{P_c (y_w - y_b) + y_b}$$

$$x = \frac{P_c (x_b - x_w) y}{y_b} + x_w$$

x/y = CIE-Farbart der mit Weiß gemischten Farbe

x_w/y_w = CIE-Farbart des Weißlichtes

x_b/y_b = CIE-Farbart auf dem Farbenzug

P_c = colorimetrische Reinheit

Die CIE-Farborte der verwendeten Weißlichter waren:

Abney-Weiß: $x_w = 0.382$

$y_w = 0.375$

Neutralweiß (Vp WK):

$x_w = 0.3084$

$y_w = 0.3063$

10.000 K: $x_w = 0.279$

$y_w = 0.291$

20.000 K: $x_w = 0.255$

$y_w = 0.261$

Die Abbildungen 5/9 und 5/10 zeigen die errechneten Werte im CIE-Diagramm.

Würde die Versuchsperson dem CIE-Normalbeobachter entsprechen, so müßten alle Farborte eines Farbtones auf einer gemeinsamen Kurve liegen. Da die individuelle Streuung jedoch beträchtlich ist, streuen auch die Farborte eines Farbtones. Die gemessenen Farborte

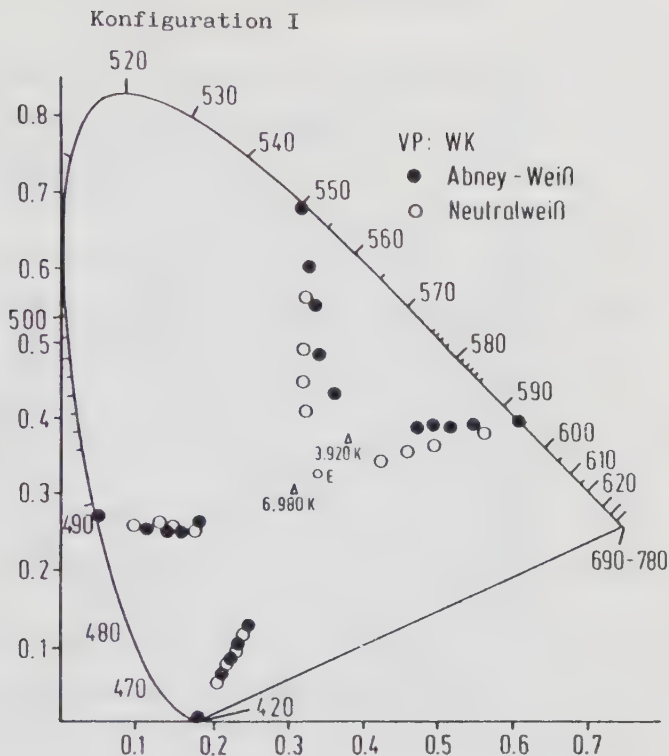


Abb. 5/9: Farborte der Farben Rotblau, Blaugrün, Grüngelb und Gelbrot im CIE-Diagramm. Eingetragen sind die Orte für die colorimetrischen Reinheiten 1.0, 0.85, 0.70, 0.60 und 0.50. Vp: WK.

zeigen eine geringere Abweichung von einer Farbgeraden als die von MacAdam (1951) gemessenen, die Krümmung entspricht etwa der von Valberg (1971) gemessenen.

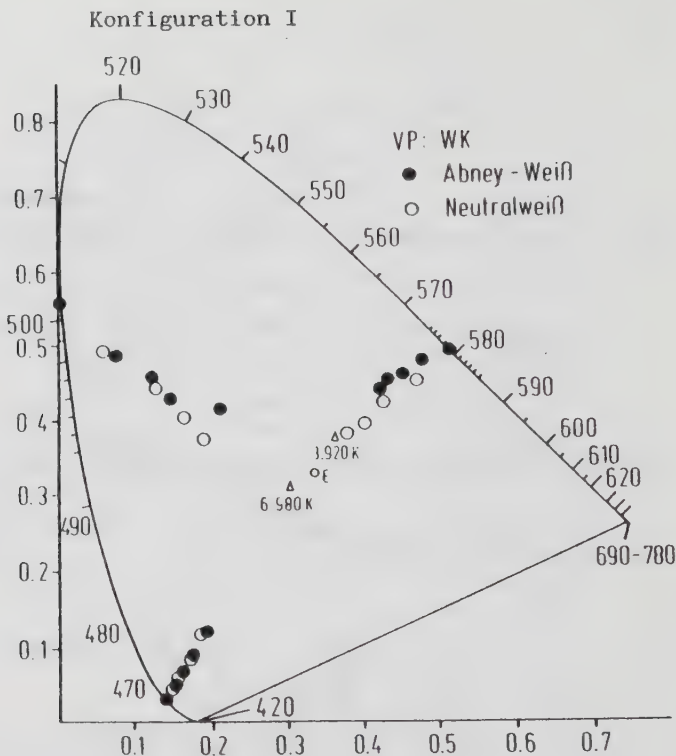


Abb. 5/10: Farborte der Farben Blau, Grün und Gelb
im CIE-Diagramm für die colorimetrischen
Reinheiten 1.00, 0.85, 0.70, 0.60 und 0.50.

5.5. Unterschiede zwischen den Versuchspersonen

Abbildung 4/4 (Seite 58) zeigt am besten die unterschiedliche Stärke der Farbortverschiebungen bei den drei Vpn. Die deutlichsten Unterschiede treten in der Zunahme der Rotempfindung bei blauen Farbtönen auf, wenn die Sättigung herabgesetzt wird. Vp GH zeigt hier eine starke Zunahme, die mit Abney-

Weiß doppelt so groß ist, wie bei Vp TLA. Die Vp WK liegt zwischen diesen Werten. Auch am langwelligenden Ende des Spektrums ist die Zunahme der Rotempfindung bei Vp GH am größten. Die geringe Rotinduktion bei Vp TLA geht einher mit einer fehlenden Zunahme der Grünempfindung bei der Entsättigung der Farbe Grüngelb. Dort nahm bei den Vpn WK und GH der Grüneindruck zu, wenn weißes Licht beigemischt wurde.

Bei Vp TLA scheint der grüne Spektralbereich eingeengt, der Farbort der Urfarbe Gelb liegt bei 569 nm, während er bei den anderen beiden Vpn bei 579 nm und 581 nm liegt. Dies könnte auf eine leichte Protanomalie hindeuten. Gleichzeitig zeigte Vp TLA eine größere Streuung bei der Bestimmung der Farborte Blaugrün, Grün und Grüngelb, was diese Vermutung unterstützt.

Die Anomaloskopwerte (Seite 30) deuten eine leichte Protanomalie der Versuchspersonen TLA und GH an, die aber beide noch als farbnormal gelten.

Da mit dem Anomaloskop sehr schwache Anomalien nicht gefunden werden können (Grützner und Jaeger, 1962), habe ich noch den Farnsworth Farbentest vorgenommen (Abbildung 5/11). Beim Farnsworth 100-Farbentest ordnet die Vp 100, durch kleine Farbtonschritte getrennte Farbplättchen. Würde die Vp keine Verwechslungen machen, so lägen alle Farbproben auf einem Kreis. Die radialen Abweichungen

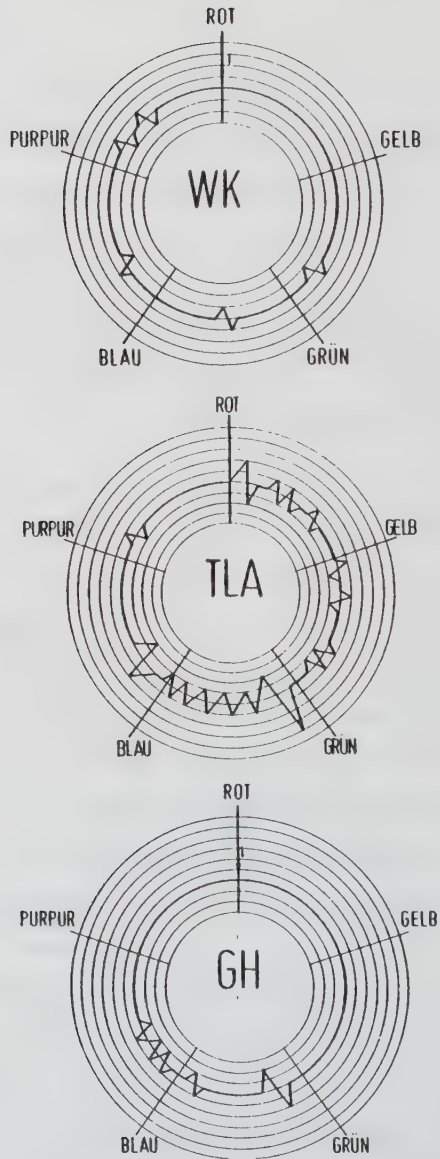


Abb. 5/11: Resultate des Farnsworth 100 Farbentests für die 3 Versuchspersonen.

davon zeigen die Größe der Verwechslungen an. Jeder Sprung von Ring zu Ring steht für die Verwechslung eines Farbtonschrittes. Vp WK und GH zeigen normale Werte, je 5 Verwechslungen. Deutlich zeigt sich bei Vp TLA eine Anhäufung von Verwechslungen im roten und blaugrünen Bereich, insgesamt 21 Verwechslungen, bei Grün eine Verwechslung über 4 Farbtonschritte.

Bei Vp TLA kann man von einer leichten Protanomalie sprechen, wofür auch noch Verwechslungen bei dem Ishihara-Test sprechen. Obschon Vp GH ähnliche Anomaloskopwerte hatte wie Vp TLA, zeigen die anderen Farbteste deutliche Unterschiede. Nach diesen zusätzlichen Untersuchungen sind Vp GH und WK völlig farbnormal.

Dieser Befund zeigt auch, daß zwar aus der Lage der Urfarborte auf Farbanomalien geschlossen werden kann, die Stärke des Abney-Effektes jedoch keine Schlußfolgerungen zuläßt, soweit es mit nur drei Vpn möglich ist, überhaupt Aussagen zu machen.

Appendix:

Teile dieser Arbeit wurden bei folgenden Seminaren und Kongressen vorgetragen:

Kurtenbach W.

Ist der Abney-Effekt ein Artefakt des verwendeten Weißlichtes?

Oberseminar über Verhaltensphysiologie, Biologische Kybernetik und verwandte Gebiete, Freiburg, SS1976.

Kurtenbach W., Spillmann L., Sternheim C.E. und Wooten B.R.

The spectral locus for psychophysically unique colours as a function of colorimetric purity.

Dt. Physiolog. Gesellsch., Herbsttagung 1976.

Pflügers Archiv 362, R44

Kurtenbach W.

Hue shift for monochromatic stimuli on a white background.

Dt. Physiolog. Gesellsch., Frühjahrstagung 1977.

Pflügers Archiv 368, R41.

Kurtenbach W.

Hue shift for monochromatic stimuli, when white light is added as a dilutant, background or surround.

Tagung experimentell arbeitender Psychologen, workshop on sensory and perceptual processes, Marburg 1978.

Kurtenbach W.

Die Farbtonverschiebung monochromatischer Reize bei weißem Hintergrund und/oder weißem Umfeld.

Seminar über Bau und Funktion des Sehsystems, Freiburg, SS 1978.

Literaturverzeichnis:

Abney W. (1910) On the changes in hue of spectrum colours by dilution with white light.
Proc. Roy. Soc. 83, 120-127.

Abney W. (1913) Researches in colour vision and the trichromatic theory.
Longmans, Green & Co., London-New York-Bombay-Calcutta.

Akita M., Graham C.H. und Hsia Y. (1964) Maintaining an absolute hue in the presence of different background colours.
Vision Res. 4, 539-556.

Alpern M. (1975) A fresh view on colour blindness.
Vortrag in der Universitäts Augenklinik Freiburg, Juni 1975.

Barlow H.B. (1953) Summation and inhibition in the frog's retina.
J. Physiol. (London) 119, 69-88.

Bauer H.D. (1975) Synthese eines Modells für die Helligkeits- und Farbtoneerzeugung des visuellen Systems.
Dissertation, Fak. für Physik, Ludwig-Maximilians-Universität, München.

Bauer H.D. und Röhler R. (1977) Brightness generation in the human visual system. Colour-brightness: A contribution of cortical colour channels to brightness sensation.
Vision Res. 10, 1211-1216.

Baumgartner G. und Hakas P. (1962) Die Neurophysiologie des simultanen Helligkeitskontrastes. Reziproke Reaktionen antagonistischer Neuronengruppen des visuellen Systems.
Pflügers Archiv 274, 489-510.

Baumgartner G., Brown J.L. und Schulz A. (1965)
Responses of single units of the cat visual system
to rectangular stimulus patterns.
J. Neurophysiol. 28, 1-18.

Bedford R.E. und Wyszecki G. (1958) Wavelength discrimination for point sources.
J. Opt. Soc. Amer. 29, 92-99.

Békésy G. v. (1968) Mach- and Hering-type lateral inhibition in vision.
Vision Res. 8, 1483-1499.

Bezold W. v. (1873) Ueber das Gesetz der Farbmischung und die physiologischen Grundfarben.
Pogg. Ann. 150, 221-247.

Boycott R.B. und Dowling J.E. (1969) Organization of the primate retina: Light microscopy.
Phil. Trans. Roy. Soc. B. 225, 109-184.

Boynton R.M. und Gordon J. (1965) Bezold-Brücke hue shift measured by a colour-naming technique.
J. Opt. Soc. Amer. 55, 78-86.

Breneman E.J. (1962) The effect of level of illuminance and relative surround luminance on the appearance of black and white photographs.
Photographic Science and Engineering 6, 172-179.

Breneman E.J. (1977) Perceived saturation in complex stimuli viewed in light and dark surrounds.
J. Opt. Soc. Amer. 67, 657-662.

Brücke E. (1878) Über einige Empfindungen im Gebiete der Sehnerven.
Sitzber. Akad. Wiss. Wien III, 77, 39-71.

Burnham R.W., Evans R.W. und Newhall S.M. (1957)
Prediction of colour appearance with different adaptation illumination.

J. Opt. Soc. Amer. 47, 35-42

Byzov A.L., Trifonov Y.A., Chailahian L.M. und Golubtzov K.W. (1977) Amplification of graded potentials in horizontal cells of the retina.

Vision Res. 17, 265-273.

Chevreul E. (1832) Sur l'influence, que deux couleurs peuvent avoir l'une sur l'autre, quand on les voit simultanément.

Mémoires de l'Académie de Paris 11, 447-520.

Cornsweet T.N. und Teller D.Y. (1965) Relation of increment threshold to brightness and luminance.

J. Opt. Soc. Amer. 55, 1303-1308.

Creutzfeldt O. (1978) Neurophysiologische Aspekte des Farbensehens.

Vortrag auf der 50. Tagung der Dt. Physiol. Ges.

DeMonasterio F.M., Gouras P. und Tolhurst D.J. (1975) Trichromatic colour opponency in ganglion cells of the rhesus monkey retina.

J. Physiol. (London) 251, 197-216.

DeValois R.L., Abramov J. und Jacobs G.H. (1966) Analysis of response patterns of LGN cells.

J. Opt. Soc. Amer. 56, 966-977.

Ebenhöh H. (1976) Mathematische Beziehungen zwischen Farbreizen und Farbempfindungen.

Diss. an der Fak. für Biologie, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.

Gath B., Dörflinger B. und Krüger J. (1978)
Retinale Ganglienzellen der Katze: Wechselwirkungen
des shift-effects mit Reaktionen auf zeitlich kon-
stante und variable Zentrumsreize.
Pflüg. Arch. 373, R82.

Godlove J.H. (1950) Color change from daylight to
nightlight, calculated and observed.
J. Opt. Soc. Amer. 41, 396-401.

Goethe J.W. (1810) Die Farbenlehre.
Cotta Verlag Tübingen.

Grüsser O.J., Grüsser-Cornehls U. und Stange D. (1976)
Simultaneous contrast functions of cat retinal ganglion
cell.
Pflüg. Arch. 362, R47.

Grützner P. und Jaeger W. (1963) Anleitung zur
Untersuchung des Farbensinns.
Entwicklung und Fortschritt in der Augenheilkunde
Hrg. F. Enke, Stuttgart 1963, 683 - 689.

Hartline H.K. (1940) The receptive field of the optic
nerve fibres.
Amer. J. Physiol. 130, 690-699.

Hartline H.K. (1949) Inhibition of activity of visual
receptors by illuminating nearby retinal areas in the
limulus eye.
Fed. Proc. 8, 69-81.

Hartmann E. (1968) Die Sofortadaptation und ihre
Bedeutung für den Sehvorgang.
Habil. Arbeit an der Nat. Fak. der Ludwig-Maximilians
Universität, München.

Harvey L.O. (1970) Flicker sensitivity and apparent-
brightness as a function of surround luminance.
J. Opt. Soc. Amer. 60, 860-864.

Hassenstein B. (1968) Modellrechnung zur Datenverarbeitung beim Farbsehen des Menschen.

Kybernetik 4, 209-223.

Heggelund P. (1971) The perceptual variations in simultaneous achromatic contrast and the bidimensional nature of achromatic colours.

Diss. an der Psychologischen Fakultät, University of Oslo.

Hemminger H. (1974) Zum Farbsehen des Menschen: Eine quantitative Darstellung der subjektiven Farbwahrnehmung normalsichtiger und anomaler Personen. Diss. an der Fak. für Biologie, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.

Hering E. (1887) Über die Theorie des simultanen Contrastes von Helmholtz.

Pflüg. Arch. 40, 172-191.

Hering E. (1920) Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn. Julius Springer, Berlin.

Hunt R.W.G. (1952) Light and dark adaptation and the perception of colour.

J. Opt. Soc. Amer. 42, 190-199.

Hunt R.W.G. (1953) The perception of colour in 1° fields for different states of adaptation.

J. Opt. Soc. Amer. 43, 479-484.

Hunt R.W.G. (1965) Measurement of colour appearance.

J. Opt. Soc. Amer. 55, 1540-1551.

Hurvich L.M. und Jameson D. (1951) A psychophysical study of white:

I: Neutral adaptation. J. Opt. Soc. Amer. 41, 521-527.

II: Area and duration as variants. J. Opt. Soc. Amer. 41, 528-536.

III: Adaptation as variant. J. Opt. Soc. Amer. 41, 787-801.

Hurvich L.M. und Jameson D. (1955) Some quantitative aspects of an opponent color theory.

I: Chromatic responses and spectral saturation. J. Opt. Soc. Amer. 45, 546-552.

II: Brightness, saturation and hue in normal and dichromatic vision. J. Opt. Soc. Amer. 45, 602-616.

Jacobs G.H. und Wascher C. (1967) Bezold-Brücke hue shift: Further measurements.

J. Opt. Soc. Amer. 57, 1155-1156.

Jameson D. und Hurvich L.M. (1951) Use of spectral hue invariant loci for specification of white stimuli.

J. Exp. Psychol. 41, 455-463.

Jameson D. und Hurvich L.M. (1964) Theory of brightness and color contrast in human vision.

Vision Res. 4, 135-154.

Jung R. (1972) Neurophysiological and psychophysical correlates in vision research.

In: Brain and Human Behavior, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg. Hrg. Karczmar A.G. und Eccles J.C.

Jung R. (1973) Handbook of Sensory Physiology, Vol. VII, 3B. Springer, Berlin-Heidelberg-New York. Hrg.

Jung R.

Jung R. (1978) Einführung in die Sehphysiologie.

In: Gauer-Kramer-Jung, Physiologie des Menschen, Das Sehen, Sinnesphysiologie III.

Urban & Schwarzenberg, München-Wien-Baltimore.

Krüger J und Fischer B. (1976) A versatile optical stimulator providing increments and decrements of brightness or pure colour contrast of moving and flashing stimuli.

Vision Res. 16, 1351-1354.

Knoerchen R. und Hildebrandt G. (1976) Tagesrhythmische Schwankungen der visuellen Lichtempfindlichkeit beim Menschen.

J. Interdiscipl. Cycle Res. 7, 51-69.

Kvaal K., Valberg A. und Seim T. (1974) A model for spectrally opponent coding of visual information. Physica Norvegica 7, 219-225.

Larimer J., Krantz D.H. und Cicerone C.M. (1974) Opponent process additivity I: red/green equilibria. Vision Res. 14, 1127-1140.

MacAdam D.L. (1950) Loci of constant hue and brightness determined with various surrounding colours.

J. Opt. Soc. Amer. 40, 589-595.

MacAdam D.L. (1951) Influence of visual adaptation on loci of constant hue and saturation.

J. Opt. Soc. Amer. 41, 615-619.

Martin E., Clymer A.B. und Martin L. (1972) Metaccontrast and saccadic suppression.

Science 178, 179-182.

Matteson H.H. (1970) Effects of surround luminances on perceptual latency.

J. Opt. Soc. Amer. 60, 1125-1131.

Matteson H.H. (1971) Effects of surround luminances on perceptual latency in the fovea.

J. Opt. Soc. Amer. 61, 1169-1172.

Mc Dougall W. (1904) The variation of the intensity of visual sensation with the duration of the stimulus.

Brit. J. Psychol. 1, 151-189.

McIlwain J.T. (1964) Receptive fields of optic tract fibers and lateral geniculate cells: Peripheral extent and barbiturate sensitivity.
J. Neurophysiol. 27, 1154-1173.

McIlwain J.T. (1966) Some evidence concerning the physiological basis of the periphery effect in the cat's retina.
Exp. Brain Res. 1, 265-271.

Mead W.R. (1967) Analysis of receptive field organization in macaque LGN cells.
Doctoral dissertation, Indiana University.

Moon P. und Spencer D.E. (1944) On the Stiles-Crawford effect.
J. Opt. Soc. Amer. 34, 319-329.

Naka K.J. und Rushton W.A.H. (1969) An attempt to analyse colour reception by electrophysiology.
J. Physiol.(London), 185, 536 - 555.

Neumeyer C., Breitmeyer B., Valberg, A. und Kurtenbach W. (1979) Oscillation of peripheral luminance grating increase foveal increment thresholds.
(eingeschickt an Vision Research)

Neumeyer C. und Spillmann L. (1977) Fading of steadily fixated large test-fields in extrafoveal vision.
Pflügers Arch. 368, R40.

Neumeyer c. und Spillmann L. (1979) The fading of steadily fixated large test-fields in extrafoveal vision and the effect of uniform or moving grating surrounds.
(eingeschickt an Vision Research)

Nilsson T.H. (1972) Effects of pulse duration and pulse rate on hue of monochromatic stimuli.
Vision Res. 12, 1907-1921.

Oehler R. und Spillmann L. (1978) Simultaneous colour contrast in coloured Hermann-grids of equal lightness and saturation.

Pflügers Arch. 373, R81

Pitt J.T. und Winter L.M. (1974) Effect of surround on perceived saturation.

J. Opt. Soc. Amer. 64, 1328-1331.

Pohl R.W. (1963) Optik und Atomphysik
Springer Heidelberg-Berlin.

Purdy D.M. (1931) Spectral hue as a function of intensity.
Am. J. Psychol. 43, 541-559.

Ransom-Hogg A. und Spillmann L. (1980) Perceptive field size in fovea and periphery of the light and dark adapted retina.

Vision Res. 20, März 1980.

Ratliff F. (1965) Mach Bands. Quantitative studies on neural networks in the retina.

Holden-Day Inc., San Francisco.

Richter M. (1951) Abhängigkeit der Anomaloskop-Einstellungen von der Jahreszeit.

Klin. Mbl. Augenheilk. 119, 569.

Ripps H., Kaplan J.T. und Siegel J.M. (1961) Effect of contrast on CFF and apparent brightness.

J. Opt. Soc. Amer. 51, 870-873.

Riggs L.A. und Ratliff F. (1952) Effects of counter-acting the normal movements of eye.

J. Opt. Soc. Amer. 42, 872-873.

Riggs L.A., Ratliff F. Cornsweet J.C. und Cornsweet T.N. (1953) The disappearance of steadily fixated visual test objects.

J. Opt. Soc. Amer. 43, 495-501.

Schober H. (1958) Das Sehen III.
Fachbuchverlag Leipzig.

Schouten J.F. und Ornstein L.S. (1939) Measurements
on direct and indirect adaptation by means of a bi-
ocular method.
J. Opt. Soc. Amer. 29, 168-182.

Siegel M.H. und Siegel A.B. (1971) Colour name as a
function of surround luminance and stimulus duration
Perc. Psychophysics 9, 140-144.

Stiles W.S. und Crawford B.H. (1933) The luminous
efficiency of ray entering the eye pupil at different
points.
Proc. Roy. Soc. London B112, 428-450.

Stiles W.S. (1959) Colour vision: the approach through
increment threshold sensitivity.
Proc. Nat. Acad. Sci. 45, 100.

Thoma W. und Scheibner H. (1978) Die tritanopische
spektrale Sättigungsfunktion beschreibt die spektrale
Trennkantenempfindlichkeit.
Pflüg. Arch. 322, R47

Tomita T., Kaneko A., Murakami M. und Pantler E.L.
(1967) Spectral response curve of single cones in the
carp.
Vision Res. 7, 519-531.

Torii S. und Uemura Y. (1965) Effects of inducing
luminance and area upon the apparent brightness of a
test field.
Jap. Psychol. Res. 7, 86-100.

Tschermak A. (1903) Über Kontrast und Irradiation.
Erg. d. Physiol. II Abt. 2, 726-798.

Valberg A. (1971) A method for the precise determination of achromatic colours including white.
Vision Res. 11, 157-160.

Valberg A. (1974) Lateral interaction between large retinal stimuli and symmetric receptive fields.
Physica Norvegica 7, 227-235.

Valberg A. (1975a) Colour induction: A study of lateral interaction in human vision.
Habilitation an der Universität Oslo, Institut für Physik.

Valberg A. (1975b) Light adaptation and the saturation of colours.
Vision Res. 15, 401-404.

Wässle H. und Heinrich F. (1970) Untersuchungen zum Helligkeitskontrast.
Vision Res. 10, 361-372.

Wässle H. (1977) Horizontalzellen in der Retina der Katze: Lichtmikroskopische Untersuchungen.
Vortrag in der Neurophysiologischen Universitätsklinik Freiburg, 30.11.77.

Wagner G. und Boynton R.M. (1972) Comparison of four methods of heterochromatic photometry.
J. Opt. Soc. Amer. 62, 1508-1515.

Walls G.L (1954) The filling-in process.
Amer. J. Optometry and Arch. Amer. Acad. Optom.
31, 329-340.

Walraven P.L. (1973) Theoretical models of the colour vision network.
Color 73, 11-18.

Wasserman G.S. (1966) Brightness enhancement and opponent-colour theory.

Vision Res. 6, 689-699

Weale R.A. (1953) Spectral sensitivity and wavelength discrimination of the peripheral retina.

J. Physiol. (London) 119, 170-182.

Werblin F.S und Dowling J.E. (1969) Organization of the retina of the mudpuppy, *necturus maculosus*. II Intracellular recordings.

J. Neurophysiol. 32, 339-355.

Werblin F.S. (1972) Lateral interactions at inner plexiform layer of vertebrate retina: Antagonistic responses to change.

Science 171, 1008-1010.

Werblin F.S. und Copenhagen D.R. (1974) Control of retinal sensitivity III: Lateral interactions at the inner plexiform layer.

J. gen. Physiol. 63, 88-110.

Werner J.S. und Wooten B.R. (1978) Opponent chromatic mechanisms: Relation to photopigments and hue naming. (nicht veröffentlichter Report)

Westheimer G. (1966) The Maxwellian View.

Vision Res. 6, 669-682.

Westphal H. (1909) Unmittelbare Bestimmung der Urfarben. Z. Sinnesphysiol. 44, 182-230.

Wiesel T.N. und Hubel D.H. (1966) Spatial and chromatic interaction in the lateral geniculate body of the rhesus monkey.

J. Neurophysiol. 29, 1115-1156.

Wild E. und Bouman M.A. (1968) The dependence of Bezold-Brücke hue shift on spatial intensity distribution.

Vision Res. 8, 303-313.

